Technical Sciences
Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61
infodesk@tno.nl

TNO 2013 R10188

Literatuurstudie
"Rattle Noise" van helikopters

Datum	Februari 2013
Auteur(s)	Hicham Zmarrou (NLR) Sabine Janssen (TNO) Arnold Koopman (TNO) Theo van Veen (NLR) Jaap van 't Hof (TNO)
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	Ir. V.M.J. Gales
Vastgesteld d.d.	09-01-2013
Titel	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Exemplaarnummer	
Oplage	12
Aantal pagina's	46
Opdrachtgever	Ministerie van Defensie Directie Ruimte, Milieu en Vastgoedbeleid
Werkopdracht	235.36.12.0041
Projectnaam:	Literatuur onderzoek helikopter "Rattle Noise"
contract nummer	235.36.12.0041
Projectnummer	NLR: 1072115 TNO: 053.02537

Samenvatting

Op verzoek van het Ministerie van Defensie hebben het NLR en TNO een literatuuronderzoek gedaan naar de effecten van door geluid opgewekte trillingen in een huis en de beleving van bewoners door geluid van in trilling gebrachte objecten. Het geluid van trillende objecten in een huis wordt in de literatuur “Rattle Noise” [1]genoemd.

Bij het uitvoeren van starts, landingen en circuitvluchten vliegen helikopters over de in de nabijheid van een vliegbasis gelegen woonbebouwing.
Door overvliegende helikopters kan lokaal een verhoogd geluidniveau ontstaan, waardoor trillingen kunnen ontstaan in huizen en objecten in een huis gaan trillen, het zogenoemde “Rattle Noise”. Dit fenomeen is niet specifiek voorbehouden aan helikopters maar kan ook ontstaan door laagfrequent geluid dat opgewekt wordt door andere geluidbronnen bijvoorbeeld schepen, stadsbussen of stroomgeneratoren.

In Nederland is niet eerder onderzoek gedaan naar het ontstaan, optreden en de beleving van “Rattle Noise” door bewoners. In dit literatuuronderzoek is vooral gebruik gemaakt van onderzoeken naar “Rattle Noise” in de Verenigde Staten.

Uit deze literatuur blijkt dat “Rattle Noise” ontstaat door laagfrequent geluid van een bepaald minimum geluidniveau, vooral bij frequenties lager dan 100 Hz. Helikopters die overvliegen kunnen dit laagfrequente geluid ook genereren. Het niveau van het laagfrequente geluid neemt toe als de helikopter naar het huis vliegt. Geluidmetingen voor de gevel van een huis waarbij een helikopter met dubbele rotorbladen en met een load op een hoogte van ca. 500 voet over een huis vliegt tonen dat het laagfrequent (0 – 100 Hz) maximale geluidniveau ca. 98 dB is. Als de helikopter voorbij het huis is neemt het laagfrequent geluid snel af. Er is tevens sprake van een sterke richtingsafhankelijke geluiduitstraling. Het niveau is afhankelijk van het weer, de afstand, vlieghoogte, rotorbladen instelling of load onder de helikopter.

Afhankelijk van de constructie van een huis kan het laagfrequent geluid dat op de buitengevel en het dak valt bouwdelen in trilling brengen. Daardoor worden vervolgens de binnenwanden in het huis weer in trillingen gebracht. De trillende wanden stralen vervolgens geluid uit in de ruimten in het huis. Dit geluid wordt door de bewoners waargenomen als laagfrequent geluid en niet als “Rattle Noise”. Doordat de afmetingen van wand en ruimte precies passen bij specifieke golflengtes van frequenties kunnen door opslingering hogere geluidniveaus ontstaan in het huis dan voor de gevel van het huis.

Door het op de gevels invallende geluid worden niet alleen de wanden van een huis in trilling gebracht, maar het geluid komt ook door de geveldelen het huis binnen. De geluidisolatie van de geveldelen zorgt ervoor dat het geluidniveau, afhankelijk van de constructie en de frequentie van het invallende geluid, binnen in het huis lager is dan buiten het huis. Echter door de vaak slechte laagfrequente geluidisolatie neemt het laagfrequent geluid veel minder of soms helemaal niet af in het huis.

Laagfrequent geluid en trillingen kunnen de huisraad, die aan de wanden hangt of op de vloeren staat, in trilling brengen waardoor “Rattle Noise” kan ontstaan. Ook kan er bij voldoende hoge geluidniveaus gebouwschade optreden. Huisraad die aan een wand is opgehangen zal veel eerder gaan trillen dan huisraad die

[1] Voor de benaming van dit fenomeen is nog geen Nederlands woord bekend. In dit onderzoek wordt het in de literatuur gebruikte woord “Rattle Noise” gebruikt.

horizontaal is opgesteld. Voor het beoordelen van schade aan gebouwen door trillingen wordt in Nederland de SBR Richtlijn A gehanteerd, hoewel deze niet zonder meer toepasbaar is voor trillingen die veroorzaakt worden door geluid. Daarvoor worden in dit rapport aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

Uit door TNO en NLR in 2011 uitgevoerd onderzoek naar mogelijke gebouwschade ten gevolge van over huizen vliegende helikopters blijkt dat er een kans op schade aan een huis kan optreden als het geluidniveau ten gevolge van laagfrequent geluid (< 100 Hz) groter is dan 100 dB, voor de gevel. Volgens de literatuur kan "Rattle Noise" optreden bij niveaus > 65 dB. "Rattle Noise" kan dus bij lagere geluidniveaus op de gevel optreden dan dat er mogelijk schade aan een huis ontstaat.

In het geval van de geanalyseerde geluidmeting van een over een huis vliegende helikopter, met dubbele rotorbladen en met een load op een hoogte van ca. 500 voet, bedraagt het gemeten laagfrequente geluidniveau tot 100 Hz ca. 98 dB. Volgens het onderzoek van Fidell [6] wordt bij een dergelijke geluidniveau door 70% van de respondenten "Rattle Noise" gerapporteerd en is meer dan 30% ernstig gehinderd. Hierbij moet in ogenschouw genomen worden dat het type huis niet duidelijk gespecificeerd is bij het in Amerika uitgevoerde onderzoek.

Er is consensus in de literatuur dat het impulsachtige karakter van helikoptergeluid niet tot gevolg heeft dat het als hinderlijker wordt ervaren dan ander vliegtuiggeluid. Zodra er echter "Rattle Noise" ontstaat dan kan dit aanleiding geven tot extra hinder. In een aantal gevallen wordt een 10 dB correctiefactor toegepast bij het beoordelen van hinder door "Rattle Noise". Indien bewoners bang zijn voor het neerstorten van een helikopter of men het idee heeft dat het geluid onnodig is omdat er bijvoorbeeld ook andere routes door de piloot gevlogen kunnen worden is de door de bewoners ondervonden hinder hoger. In lijn met bevindingen uit onderzoek naar gezondheidseffecten van vliegtuiggeluid, biedt één studie voorzichtige aanwijzingen voor soortgelijke effecten onder bewoners in de nabijheid van een helikopterbasis.

Veelal gaat het in de literatuur over Amerikaanse huizen en bewoners.
De huizen zijn vaak gebouwd met lichte constructies die niet overeenkomen met Nederlandse bouwconstructies. Het is daarom niet duidelijk in hoeverre de in de literatuur genoemde hinderreactie en grenswaarden voor het optreden van "Rattle Noise" van toepassing zijn in Nederland. Nader onderzoek naar het effect van laagfrequent geluid en "Rattle Noise" in specifiek Nederlandse huizen is nodig om beter inzicht te krijgen in het fenomeen "Rattle Noise".

Inhoudsopgave

1 Inleiding

Op verzoek van het Ministerie van Defensie Directie Ruimte, Milieu en Vastgoedbeleid hebben het NLR en TNO samen een literatuur onderzoek uitgevoerd naar het ontstaan van door geluid geïntroduceerde “Rattle Noise” en de beleving van het “Rattle Noise” ten gevolg van een overvliegende helikopter.

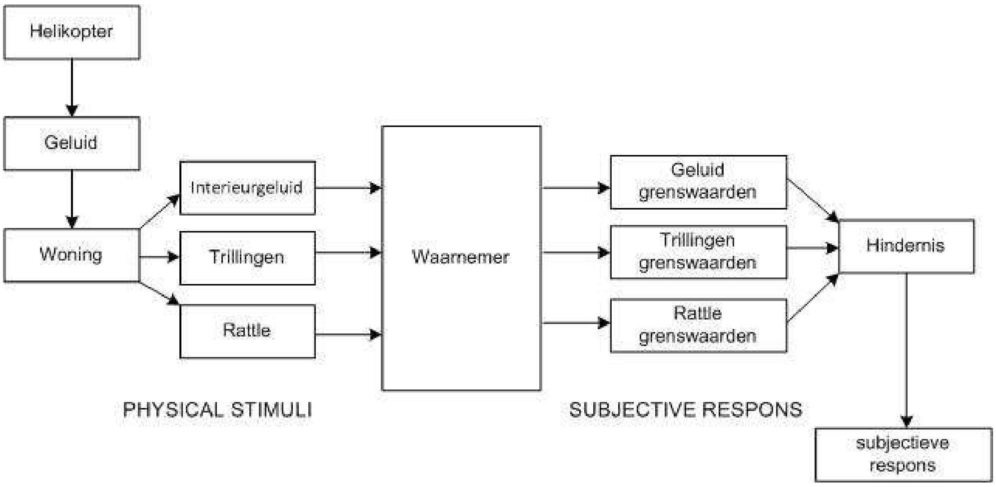
Vliegbasis Gilze-Rijen is een helikopterbasis, gelegen in de gemeente Gilze en Rijen, Noord-Brabant. Er zijn helikopters gestationeerd van het Defensie Helikopter Commando (DHC). Met deze helikopters ondersteunt het DHC operaties van de hele Defensieorganisatie, onder meer de Luchtmobiele Brigade, het Korps Mariniers, het Korps Commandotroepen en de Brigade Speciale Beveiligingsopdrachten van de Koninklijke Marechaussee. Ook ondersteunt het DHC VN- en NAVO-operaties in uitzendgebieden.

Het Defensie Helikopter Commando is dé leverancier van helikoptercapaciteit voor Defensie. Daarmee draagt het DHC bij aan het uitvoeren van Defensietaken, waar en wanneer dat nodig is. Veilig, rond de klok en wereldwijd. Het DHC levert daartoe gemotiveerd personeel, doeltreffende producten, luchtwaardig materieel, kennis van zaken en goede ondersteuning.

Bij het uitvoeren van starts, landingen en circuitvluchten vliegen helikopters over de in de nabijheid van een vliegbasis gelegen woonbebouwing. Door het geluid van de overvliegende helikopters kan lokaal een verhoogd geluidniveau ontstaan, kunnen trillingen ontstaan in huizen en kunnen objecten in een huis gaan trillen, het zogenoemde “Rattle Noise”.

Door dit onderzoek krijgt Defensie o.a. meer inzicht in:
- wat is “Rattle Noise”,
- wanneer treedt het op,
- hoe beleven bewoners het,
- op welke locaties kunnen deze effecten optreden.

Met deze informatie kunnen in de situaties waarbij het geluid mogelijk tot te veel hinder leidt, in de toekomst maatregelen worden getroffen om de hinder zoveel mogelijk te beperken of te vermijden.
De locaties waar “Rattle Noise” kan optreden worden aangeduid als *“hot spots”* waar een grote kans op “Rattle”, zoals gedefinieerd in de literatuur, kan ontstaan.
De blootstellingsmaat, waarmee de hinder zou moeten worden beschreven, is in dit rapport niet onderzocht. Hiervoor moet een uitgebreider onderzoek plaatsvinden waar ook de beleving van hinder wordt meegenomen.
In dit rapport wordt de bewoner die zich in een huis bevindt, waarover een helikopter vliegt, centraal gesteld. In figuur 1.1 is weergegeven hoe helikoptergeluid tot verschillende bronnen van hinder kan leiden.



Figuur 1.1: Overzicht van overdrachtspaden, physical stimuli[2] en subjective response[3].

De ervaringen van een bewoner kunnen in sommige situaties worden beschreven als de waarneming van het geluid van trillende objecten in een huis, dit wordt in de literatuur “Rattle” genoemd.
In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt ingegaan op het geluid van een helikopter en het verband tussen laagfrequent geluid en het mogelijk ontstaan van “Rattle Noise”. Welke overdrachtspaden van belang zijn voor de geluidoverdracht en hoe “Rattle Noise” mogelijk kan ontstaan wordt in hoofdstuk 3 beschreven. Tevens zijn in deze paragraaf de resultaten van een kleine literatuur studie over dit onderwerp opgenomen. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving hoe geluid zich voortplant binnen een huis op basis van de beschikbare kennis en literatuur. Hoofdstuk 5 geeft een korte beschrijving van de kennis over effecten van geluid en trillingen veroorzaakt door helikopters op bewoners. Deze beschrijving is gebaseerd op een studie van de literatuur waarbij hinder, houding en gezondheid als belangrijk worden beschreven. De bevindingen uit de bovengenoemde hoofdstukken van dit rapport worden samengevat in hoofdstuk 6. Dit onderzoek heeft geleid tot een aantal inzichten in het “Rattle Noise” geluid maar heeft ook nieuwe vragen opgeworpen. Door de beperkte omvang van dit project kunnen deze nieuwe vragen niet worden beantwoord en worden ze als aanbevelingen voor verder onderzoek in hoofdstuk 7 genoemd.

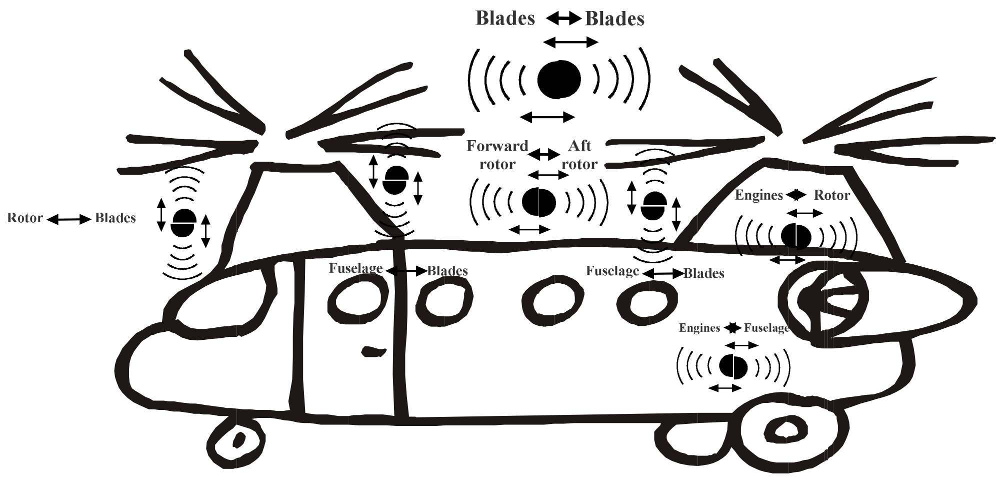
[2] Stimuli aangeboden aan het lichaam, bijvoorbeeld geluid en/of trillingen
[3] Persoonlijke, gevoelsmatige reactie, bijvoorbeeld voelbaar, matig, ernstig etc.

2 Algemene beschrijving van het helikoptergeluid

De bron van het helikoptergeluid wordt over het algemeen ingedeeld in twee verschillende sub-bronnen: het geluid van de rotoren en het geluid van de motoren (turbines). Deze bronnen produceren een breedband stochastische geluidspectrum evenals discrete tonale frequentiecomponenten. De rotoren kunnen in sommige situaties een zeer impulsachtig geluid genereren, dat in het Engels ‘blade-slap’ wordt genoemd. Referenties [17], [18] en [21] bevatten een overzicht van de fysische mechanismen die het geluid van de helikopter genereren. De volgende samenvatting is grotendeels gebaseerd op de eerder genoemde referenties en gaat in op het geluid van de rotorbladen en het geluid van de motoren.

2.1 Het geluid van de rotorbladen

De aerodynamische eigenschappen van de rotorbladen van een helikopter zijn gecompliceerd, vanwege de combinatie van de dynamica van de roterende bladen en het voorwaarts vliegen van de helikopter. Deze eigenschappen worden verder gecompliceerd door de interacties tussen de wake[4] van de rotoren, de romp van de helikopter en de rotorbladen. Deze verschillende, onstabiele, aerodynamische interacties, de transmissie en de motor(en) produceren het karakteristieke geluid van de helikopter. Dit geluid wordt meestal gedomineerd door de veranderende aerodynamische omgeving van de rotorbladen. Figuur 2.1 toont typische aerodynamische interacties die plaats kunnen vinden en helikoptergeluid kunnen veroorzaken.

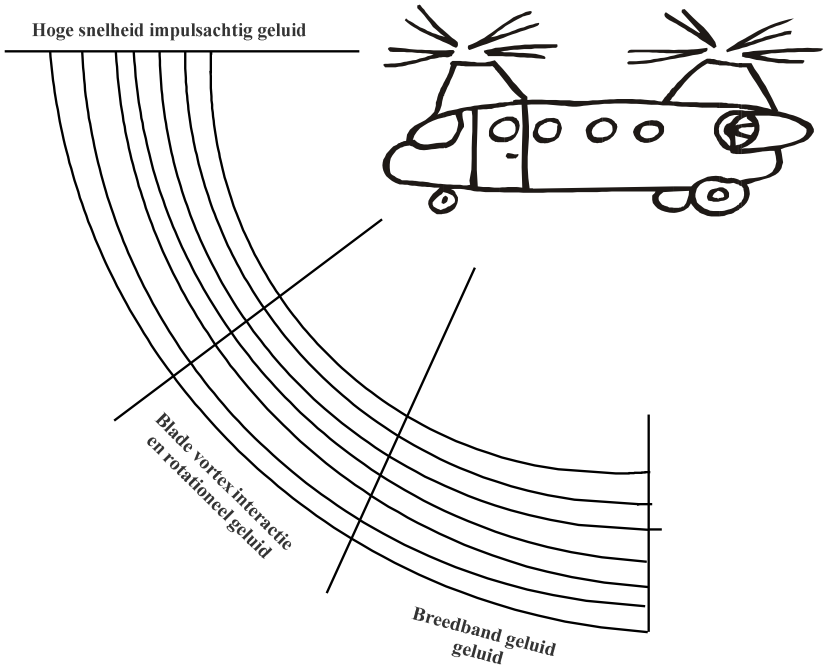


Figuur 2.1: Voorbeeld van aerodynamische interacties die als geluidbronnen beschouwd kunnen worden.

De waarnemingen van deze aero-akoestische interacties worden in het algemeen ingedeeld in vier hoofdtypen: breedband geluid, rotationeel geluid, impulsachtig geluid door hoge snelheid en het blade vortex interactie (BVI) geluid, zie figuur 2.2. Wanneer het BVI-geluid optreedt, is het zeer impulsief en domineert het, over het

[4] Een wake is de “zog” turbulentie die door de hoofdrotoren word veroorzaakt tijdens het draaien van de rotoren.

algemeen, de andere bronnen van geluid. Alvorens in te gaan op het BVI-geluid is het nuttig de andere bronnen van het geluid te begrijpen.



Figuur 2.2: De verschillende soorten geluid van de helikopterrotoren.

2.1.1 *Breedbandgeluid*

Breedbandgeluid (150-1000 Hz) is het geluid dat gegenereerd wordt door schommelingen in de luchtdruk uitgeoefend op de rotorbladen. Dit geluid is het gevolg van de interactie tussen de turbulente stroming veroorzaakt door de atmosfeer en de turbulente wake gegenereerd door de rotorbladen. Dit geluid heeft geen onderscheidende frequenties die het spectrum kunnen domineren.
De geluidenergie in dit breedbandgeluid is verdeeld over een aanzienlijk deel van het spectrum van ongeveer 150 tot 1000 Hz ((referentie [21])). Breedbandgeluid is meestal lager in amplitude dan het geluid veroorzaakt door de andere geluidbronnen, dat hieronder wordt beschreven.

2.1.2 *Rotationeel geluid*

Rotationeel geluid is het laagfrequent geluid dat gegenereerd wordt door de druk die de draaiende rotorbladen op de lucht uitoefenen, bijvoorbeeld wanneer de rotorbladen lift genereren. Het rotationele geluid maakt dat een helikopter op grote afstand zeer goed waarneembaar is, aangezien laagfrequent geluid zich goed voorplant in de lucht. Het powerspectrum van het geluid van een helikopter heeft pieken in de hogere harmonische frequenties. Figuur 2.9 geeft het frequentiespectrum van een typisch geluidsignaal van een helikopter waaruit blijkt dat de geluidenergie in de hogere harmonische frequenties van het rotationele geluid domineren. Het powerspectrum kan sterk variëren en hangt af van de geometrie en de operationele condities van de rotor.

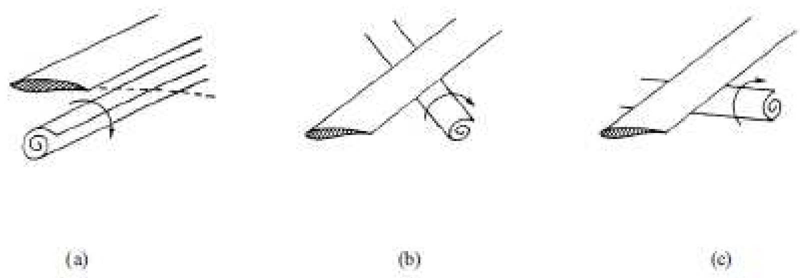
2.1.3 *Hoge snelheid impulsief geluid*

Hoge snelheid impulsief (HSI-geluid) is het impulsief (abrupt) geluid dat ontstaat wanneer schokgolven ontstaan op de uiteinden van de rotorbladen als gevolg van hun hoge snelheid. Voor helikopters met een karakteristiek HSI-geluid wordt het

geluiddrukniveau gekenmerkt door grote, scherpe, negatieve pieken. Het geluid propageert zich *in het vlak van de rotor*. Het HSI-geluid is over het algemeen een probleem voor "oudere" helikopters, zoals de tweebladige helikopters.
Een tweebladige rotor moet namelijk sneller draaien dan een meer bladige rotor om de nodige lift te genereren. Daardoor hebben de huidige helikopters rotoren met meer en dunnere bladen die met een lagere snelheid kunnen opereren en die vervolgens het HSI-geluid kunnen beperken.

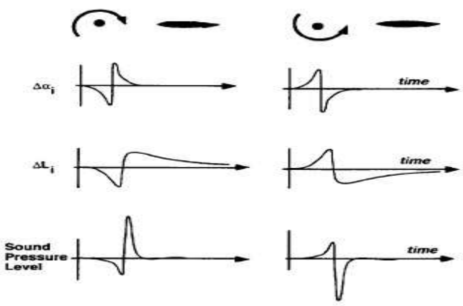
2.1.4 *Blade vortex interactie (BVI-geluid)*

Het mechanisme voor het ontstaan van het BVI-geluid kan als volgt worden samengevat:
In bepaalde vliegcondities, bijvoorbeeld wanneer een helikopter met een lage snelheid vliegt of een landingsplatform nadert, verplaatst de luchtinstroom (*upwash*) de wake van de rotor en de “-vortices” van de rotorbladen naar het rotordiskvlak en boven het rotordiskvlak. Daardoor ontstaan “wake vortices” met een as die zo goed als parallel is aan het vlak van de rotorbladen, waardoor de bladen het gehele stromingsveld van de vortex passeren. Dit is de zogenaamde parallelle BVI.
Vanuit akoestisch oogpunt is deze parallelle BVI het sterkste en het meest belangrijke verschijnsel. Het is een korte en sterke verandering in de beweging van de rotorbladen wanneer deze het vortex stromingsveld passeren. Figuur 2.3 laat de verschillende soorten BVI zien.



Figuur 2.3: Drie helikopter-BVI-soorten: a. parallelle as, b. schuine as en c. loodlijn as.

Het BVI-geluid verschilt vooral van het HSI-geluid omdat in tegenstelling tot het HSI-geluid het BVI-geluid zich *voorplant vanuit het rotorvlak*, meestal naar voren en *in een hoek van 30 tot 40 graden naar beneden*. Daarom is dit geluid beter hoorbaar voor een waarnemer op de grond als een helikopter een landingsplatform nadert. Voor tandemrotorhelikopters, zoals een chinook, kan het BVI-geluid nog sterker gegenereerd worden. Dit kan gebeuren wanneer de wake vortex uit de voorste rotor interacteert met de bladen van de achterste rotor (referentie [17] en [18]).
Het BVI-geluid wordt gekenmerkt door scherp positieve of negatieve drukpieken, afhankelijk van de draairichting van de vortex. Figuur 2.4 geeft linksboven een schematische representatie van een rechtsdraaiende vortex en het rotorblad.
De volgende grafiek toont de verandering in de invalshoek van het rotorblad ten gevolge van de interactie met de vortex. Door deze interactie wordt de lift van de rotor beïnvloed (zoals geschetst in de derde grafiek van boven) die vervolgens de luchtdrukwisselingen veroorzaakt, die verantwoordelijk zijn voor het waargenomen geluid.



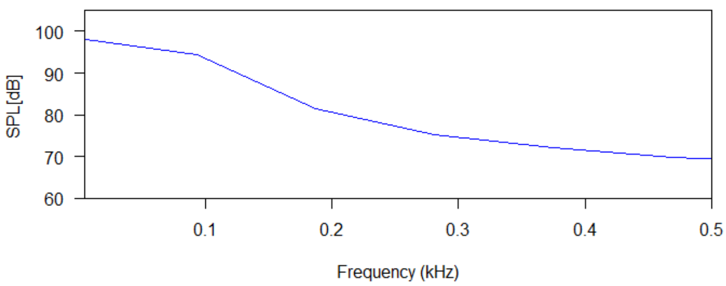
Figuur 2.4: Voorbeelden van de bron van het BVI-geluid.

2.2 Het geluid van de motoren

Helikopters worden over het algemeen aangedreven door verbrandingsmotoren die de rotoren laten draaien. De draaiende rotoren leveren draagkracht en stuwkracht aan de helikopter. De meerderheid van de huidige helikopters gebruikt “turboshaft” motoren. Het kenmerkende geluid van deze motoren bestaat uit twee bronnen: een geluidbron buiten de motoren en een geluidbron in de motoren. De geluidbron buiten de motor is het jet geluid. Dit geluid wordt geproduceerd door de impulsuitwisseling die plaatsvindt tussen de hoge snelheid van de uitlaatgassen en de lage snelheid van de omgevingslucht die resulteert in een turbulente schuifspanning. Deze turbulentie genereert luchtdrukschommelingen die als geluidveld naar de grond worden uitgezonden. Jet geluid is zelden een belangrijk onderdeel van het totale motorgeluid bij helikopters, zie referentie [21]. Interne geluidbronnen zoals het geluid van de verbranding en het geluid van de turbine worden als sterker ervaren. De geluidenergie in het motorgeluid is verdeeld over een aanzienlijk deel van het spectrum en is meestal minder sterk dan die van de andere genoemde geluidbronnen.

2.3 Het geluidspectrum

De combinatie van de bovengenoemde geluidbronnen produceert het karakteristieke geluid van helikopters. Het generieke gemiddelde geluidspectrum van een overvlucht met een typische tandemrotorhelikopter is in figuur 2.5 weergegeven. Het geluidspectrum heeft aanzienlijk meer geluidenergie in de lage frequenties, en geeft een gestage daling van akoestische energie met toenemende frequenties.



Figuur 2.5: Gemiddeld frequentie spectrum van 0 – 500 Hz van een overvlucht op korte afstand van de microfoon (de gemiddelde relatieve amplitude van de frequentie verdeling) van de meting van 28 april 2011 om 10.59 uur.

2.4 Akoestische eigenschappen

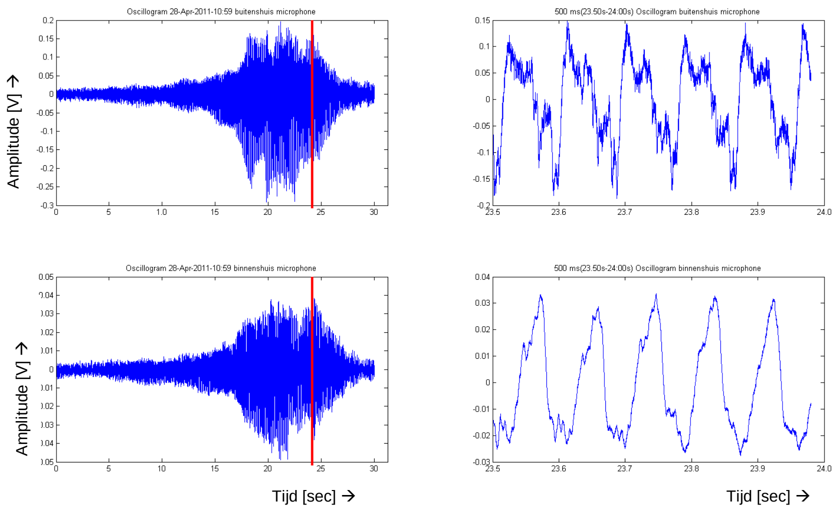
Om een beter beeld te krijgen van de verschillende geluidbronnen van een helikopter en van de rol die zij spelen bij direct en indirect (trillingen van huizen, “Rattle Noise”) geluid wat door waarnemers wordt ervaren, rapporteren wij in deze paragraaf de analyse van een door het NLR verrichte helikoptergeluidmeting. Het doel van deze metingen was het registeren van geluid en trillingen afkomstig van helikopters die van en naar de luchtmachtbasis Gilze-Rijen vlogen. Hierbij zijn gedurende lange periodes gegevens verzameld. Voor de geluidmetingen werden 2 microfoons in een huis geplaatst en twee microfoons buiten voor het huis, zodat zowel de geluidniveaus binnen als buiten gemeten konden worden.

Gedurende de metingen heeft de waarnemer van het huis een logboek bijgehouden waarin onder andere is aangegeven hoe hinderlijk het geluid is ervaren.
De waarnemer heeft ook genoteerd of er “Rattle Noise” is waargenomen. Met deze informatie kunnen de meest hinderlijke helikopterpassages gedetailleerd worden onderzocht. Voor de analyse in dit rapport hebben wij de geluidmeting van 28 april 2011, 10.59 uur als voorbeeld genomen. Het geluid gedurende deze dag werd door de waarnemer als representatief betiteld.

2.4.1 Analyse van het tijdssignaal

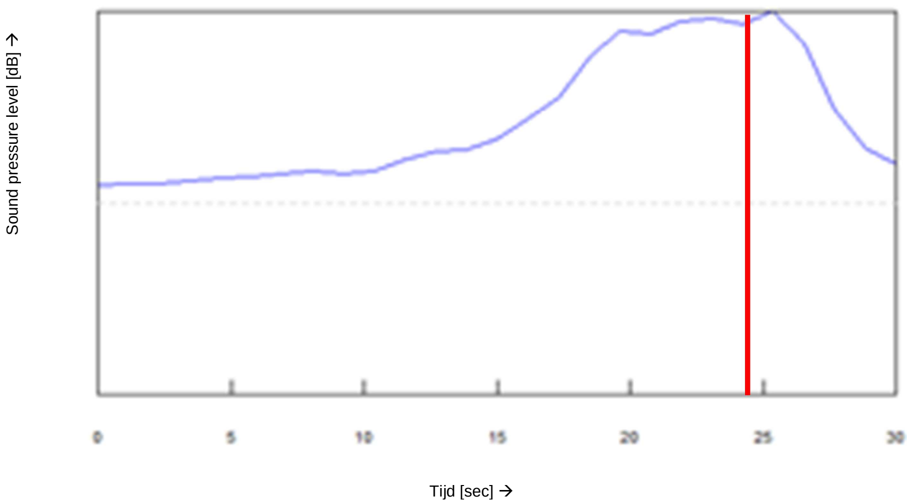
De variatie van het geluidniveau in de tijd kan het beste onderzocht worden met behulp van twee tijdsschalen: 1) een kleine tijdsschaal, in de orde van tientallen milliseconden, rechtstreeks gerelateerd aan het rpm (toeren per minuut) van de helikopterrotoren en representatief voor het rotorbladengeluid en het impulsieve “blade-slap” verschijnsel, en 2) een grotere tijdsschaal in de orde van enkele seconden (10 a 30 seconden) om de verandering van de geluiddruk van de helikopter gedurende de passage in de verschillende fases van het overvliegen te onderzoeken. Figuur 2.6 geeft een oscillogram[5] van een Chinook passage, opgenomen op 28 april 2011,10.59 uur. De 50 millisecondengrafiek van het oscillogram (rechtsboven) laat een mengeling van periodieke en stochastische schommelingen zien. Het oscillogram vertoont paren van pieken die zeer waarschijnlijk het gevolg zijn van het BVI-verschijnsel (één piek voor elke blad).
De ruis in het signaal is een breedbandsignaal en zou het breedbandgeluid van paragraaf 2.1.1 en het geluid van de motoren kunnen verklaren. De tijd tussen opeenvolgende pieken verklaart de periodiciteit van de rotorblad passages.

[5] Een oscillogram is een registratie van het geluiddrukniveau als een functie van de tijd.



Figuur 2.6: Oscillogrammen van het geluidsignaal van een voorbij vliegende helikopter opgenomen op 28 april 2011 om 10.59 uur, van linksboven naar rechtsonder:
1) 30 seconden (buitenshuis);
2) 500 ms. (buitenshuis);
3) 30 seconden binnenshuis;
4) 500 ms. binnenshuis.
De rode verticale lijn wijst naar het tijdstip wanneer de helikopter over het huis vloog.

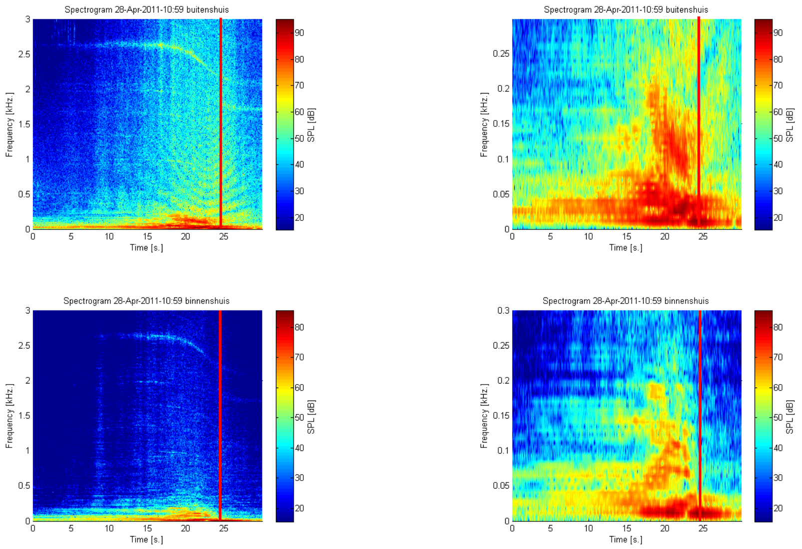
Op een grotere tijdsschaal toont Figuur 2.7 een grafiek van het geluidsignaal (SPL (slow), zoals geregistreerd door de microfoon buitenshuis, voor een periode van 30 seconden. Het geluidsignaal groeit geleidelijk naar een maximum om vervolgens snel af te nemen, zodra de helikopter de waarnemingsplaats nadert. Deze overgang die vlak voor de passage van de microfoon en dus op de waarnemingsplaats optreedt, draagt ook bij aan het karakteristieke geluid van de helikopter overvluchten.



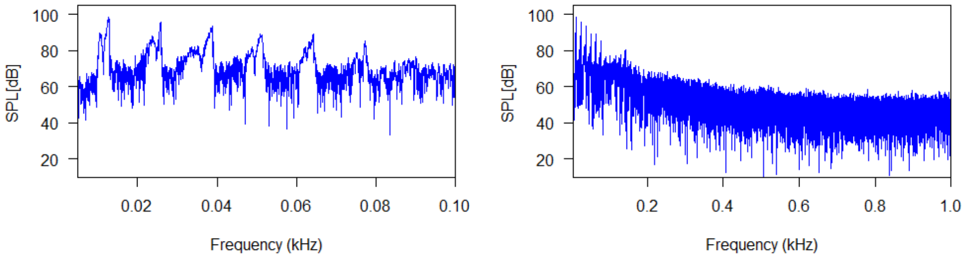
Figuur 2.7: Het sound pressure level van het opgenomen geluidsignaal op de buitenshuis geplaatste microfoon op 28 april 2011 om 10:59 uur. De rode verticale lijn wijst naar het tijdstip wanneer de helikopter over het huis vloog.

2.4.2 *Analyse in het frequentiedomein*

De analyse van het spectrum van een helikopter met tandem rotoren is veel te complex om binnen dit onderzoek te behandelen; toch kunnen we een aantal eigenschappen uit het spectrogram en het spectrum van figuur 2.8 en figuur 2.9 afleiden. Het spectrum wordt gekenmerkt door een aanzienlijke hoeveelheid laagfrequente energie in het interval van 10 tot 100 Hz en geeft de grondtoon weer van de harmonische frequentie die de periodieke pieken in het tijdssignaal maken. Het gemeten laagfrequente geluidniveau tot 100 Hz tijdens het overvliegen van de helikopter met dubbele rotorbladen en met een load op een hoogte van ca. 500 voet, bedraagt in dit geval ca. 98 dB. De amplitude van deze harmonische neemt af als de frequentie stijgt en verdwijnt bij nog hogere frequenties. Toch blijven bij deze hogere frequenties significante amplitudes zichtbaar vanwege de andere bronnen: het breedband geluid van de rotorbladen van paragraaf 2.1.1 en het motorgeluid, zie figuur 2.9. Zo zijn het rotationele geluid en het BVI-geluid verantwoordelijk voor de laagfrequente componenten van het geluid, terwijl de andere geluidbronnen verantwoordelijk zijn voor de relatief hoogfrequente componenten.



Figuur 2.8: Het spectrogram van het geluidsignaal van een voorbij de microfoon vliegende helikopter, van linksboven naar rechtsonder:
1) frequentie range [0 3000 Hz] buitenshuis;
2) frequentie range [0 300Hz] buitenshuis;
3) frequentie range [0 3000 Hz] binnenshuis;
4) frequentie range [0 300Hz] binnenshuis;
De rode verticale lijn wijst naar het tijdstip wanneer de helikopter over het huis vloog.



Figuur 2.9: Frequentiespectrum van het gemiddelde geluidsignaal van de passage over de buitenshuis geplaatste microfoon. Links van 0 – 100 Hz en rechts van 0 – 1000 Hz.

3 Overdracht

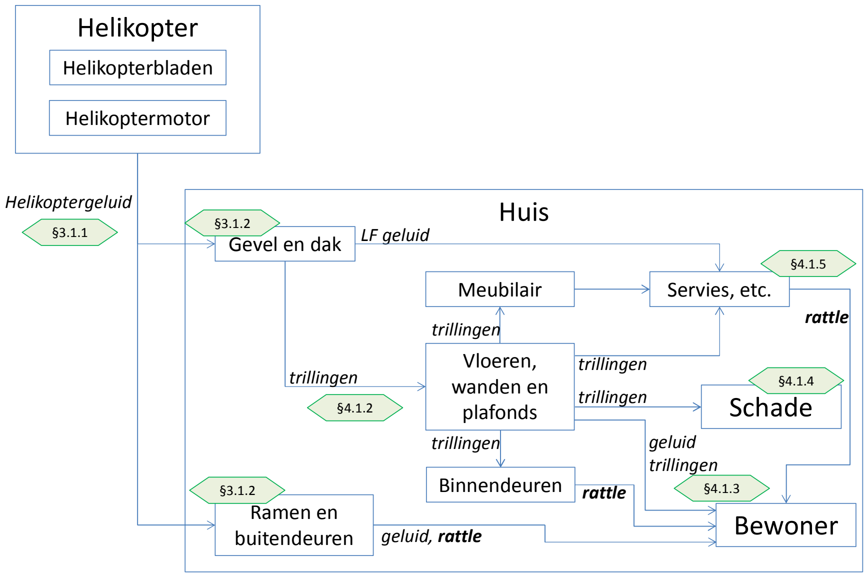
Helikopters genereren vooral geluid bij lage frequenties: onder de 100 Hz, en dan vooral rond de 20 Hz (zie bijv. figuren 2.5 en 2.9). Dit laagfrequente karakter van het geluid kan op 3 manieren "Rattle Noise" veroorzaken vanwege de volgende redenen:

1) De verzwakking door de atmosfeer is minimaal.
2) De overdracht naar een huis is bij lage frequenties sterker.
3) De overdracht in een huis is bij lage frequenties sterker.
4) Geratel van deuren, ramen en huisraad wordt primair door laagfrequente trillingen veroorzaakt.

Het laagfrequente karakter van helikoptergeluid zal daarom in de komende hoofdstukken een prominente rol spelen.

3.1 Beschrijving overdrachtspaden

Deze paragraaf beschrijft hoe geluid zich voortplant van een helikopter naar een huis, op basis van de beschikbare kennis en literatuur. In de volgende paragraaf wordt die literatuur verder toegelicht, als onderbouwing van deze paragraaf. Onderstaande figuur 3.1 geeft een overzicht van de overdrachtspaden van buiten naar (onderdelen van) een huis (behandeld in dit hoofdstuk) en binnen in het huis (hoofdstuk 4).



Figuur 3.1: Schematisch overzicht van de overdracht van geluid naar een huis, trillingen- en geluid (+ overdracht) in een huis.

3.1.1 Buiten het huis

De luchtdrukvariaties die de helikopter veroorzaakt, zoals beschreven in het hoofdstuk 2, planten zich voort als geluid en breiden zich uit volgens het Huygens Principe. Het verzwakt daardoor. Op een afstand die enkele malen groter is dan de afmeting van de helikopter is die verzwakking 6 dB per afstandsverdubbeling (als niet lineaire effecten worden verwaarloosd), onafhankelijk van de

richtingskarakteristiek van de bron. Uiteindelijk valt het geluid als een vlakke golf op de grond en op de gevels en daken van huizen.

Geluid wordt, naast de reductie door afstandsverdubbeling, ook nog gedempt door het medium lucht zelf. Die demping is een percentage per golflengte, welke afhangt van de temperatuur en de luchtvochtigheid. De totale reductie hangt dus af van de afstand, in golflengten, tussen bron en ontvanger en de meteorologische omstandigheden. Aangezien bij lage frequenties (van bijvoorbeeld helikopter geluid) de golflengtes evenredig langer zijn is die luchtdemping dus ook evenredig geringer, waardoor dit dempingseffect dus minder een rol speelt.

De richtingskarakteristiek van een (sub) bron zorgt ervoor dat het geluidniveau bij het huis onder andere af hangt van de hoeken waarop de helikopter zicht bevindt ten opzichte van het huis. Bij een specifieke azimut en elevatie is het geluidniveau het sterkst. Weersomstandigheden, zoals windsterkte en –richting, en gradiënten in wind en temperatuur, kunnen deze hoeken, alsmede de geluidsterkte, beïnvloeden. Bij lagere frequenties is die invloed minder.

Ter plekke van de gevel en de daken (van hier af in deze tekst samengevat tot: de gevel) vindt een drukverdubbeling plaats vanwege de reflectie op een vlak. Met dit effect wordt in de akoestiek normaal gesproken automatisch rekening gehouden, bijv. in de rekenregels en in de meetmethoden (waarbij niet aan de gevel maar 2 meter voor de gevel wordt gemeten). Bij lage frequenties is dit effect sterker.
De drukverdubbeling vindt namelijk plaats binnen een kwart golflengte van het geluid. Bij bijv. 125 Hz is dat 70 centimeter. Bij 12 Hz is dat al 7 meter.
Dat betekent dat een maaiveld, voor het huis, ook als reflector gaat meetellen en dit zorgt voor 3 dB extra niveau op de gevel.

Een ander effect van belang, voor de laagfrequente componenten, is dat door de grote golflengte geluid rond obstakels “spoelt”. De afschermende werking van geluidschermen, huizen e.d. verdwijnt naarmate de golflengte groter wordt.
Bij 12 Hz, met een golflengte van ongeveer 30 meter, heeft een vrijstaand huis, of een rijtje huizen, geen afschermende werking meer. Dat betekent dat geluid van alle kanten het huis binnen zal treden. Er is geen “luwe” zijde.

3.1.2 Het huis in

Het geluid dat op de gevel valt heeft het karakter van een “krachtbron”: er wordt een druk(-variatie) uitgeoefend op de gevel onafhankelijk van de akoestische eigenschappen van de gevel. Kenmerkend voor de akoestische eigenschappen van de gevel is de mate waarin deze als reactie op geluidgolven gaat trillen.
Zwaardere en/of stijvere delen trillen bij een gegeven drukvariatie minder dan lichte en/of slappe delen. Binnen het huis geldt het omgekeerde, trillende onderdelen, zoals wanden en vloeren, leggen een druk(-variatie) op aan de lucht in het huis, leiden tot geluid in het huis.

Geluid van buiten brengt ramen, en deuren, dus tot hogere trillingsniveaus dan bakstenen muren e.d. Omdat ramen en deuren zo slap en licht zijn vergeleken met de muren zullen zij ook maar in zeer beperkte mate de omringende muren in trilling brengen maar des te meer de lucht binnen het huis.

Lichte onderdelen in de gevel, zoals ramen, vormen dus een belangrijke doorvoer van geluid. Omdat er, aan buiten-oppervlak van een huis, meestal meer gevel is, en daaraan verbonden binnenwanden, vloeren en wanden, kan het pad door een stenen gevel ook nog steeds van belang zijn.
De lichte onderdelen in de gevel worden, zoals beschreven, in trilling gebracht.
Bij lage frequenties is, bij een gegeven geluiddruk, de relatieve *verplaatsing* van zo'n onderdeel groter dan bij hogere frequenties. Ook zijn er bij lage frequenties vaak geen buigvormen meer waarin het onderdeel kan gaan trillen. Het effect is dat zo'n onderdeel zich in zijn geheel ten opzichte van de omgeving, zoals de kozijnen, gaat bewegen. Zit er speling in de ophanging, dan is dat een relatief ongehinderde beweging die steeds acuut tot stilstand wordt gebracht, wat (hoogfrequent) geluid tot gevolg heeft. Dit is “secundair” geluid, waarvan het ratelen van deuren en ramen de belangrijkste voorbeelden vormen, de eerste vorm van “Rattle Noise”.

Geratel van deuren en ramen is dus proportioneel met een (wisselende) *verplaatsing*. Dit in tegenstelling tot secundair geluid c.q. “Rattle Noise” van huisraad, welke proportioneel is met *versnelling* van een ondersteunend oppervlak (nl. overwinning van de zwaartekrachtsversnelling) of met primair geluid welke proportioneel is met de *snelheid* van een afstralend oppervlak.
Hoe lager de frequentie van een zeker geluiddrukniveau hoe groter de verplaatsing is van een aangestraald oppervlak. Samen met een gebrek aan buigvormen bij lage frequenties maakt dat geratel van deuren en ramen een typisch probleem zijn voor laagfrequent geluid.

In de Amerikaanse literatuur wordt over de relatie tussen geluidniveau en “Rattle Noise” van bouwdelen vooral Hubbard [14] geciteerd, waarin hij een bepaald drempelwaarde spectrum voor ramen, vloeren en wanden geeft. Dat spectrum is echter bepaald op grond van theoretische (hoogfrequente) relaties tussen geluid en trillingen en de ISO norm voor voelbare trillingen (ISO2631). Opmerkelijk genoeg blijkt de curve voor ramen wel overeen te komen met “Rattle Noise”-waargenomen in de VS (Brooks[3], Fidell [6]). De curves zijn overgenomen door NASA stelt Brooks, hoewel geen document wordt genoemd.

De grens komt neer op 59 dB bij 12,5 Hz, 65 dB bij 20 Hz en 3 dB per hogere tertsband. Dit geldt dus voor de Amerikaanse bouwstijl.

3.1.3 Binnen in het huis

Trilt de gevel, en daardoor de hoofddraagconstructie van het gebouw, dan planten trillingen zich naar binnen voort op twee manieren. Aan de binnenkant van de gevel stralen gevelonderdelen geluid af (vooral de ramen), eventueel vergezeld door secundair geluid. Maar de meeste trillingsenergie plant zich verder voort de constructieonderdelen in, naar binnenwanden, vloeren en plafonds. Ook deze onderdelen zullen vervolgens geluid afstralen, waaronder secundair geluid vanwege bijvoorbeeld trillende binnendeuren.
De trillingen in de bouwdelen worden opgelegd aan alles wat daar aan vast zit: de huisraad, schilderijen aan muren, kasten op vloeren, lampen aan plafonds, etc.
Dit vormt het onderwerp van hoofdstuk 4.

3.2 Behandeling belangrijkste literatuur

3.2.1 Brooks, over geluidniveau voor “Rattle Noise” van ramen [3]

Brooks BM (1993). *Low Frequency Noise Induced Vibration of Housing Structure*. Proc. Ac.Soc.Am. 126th meeting, Colorado.

Abstract
Deze presentatie (ppt sheets avant la lettre) beschrijft een case-studie waarin wordt aangetoond dat het NASA-criterium voor “Rattle Noise” van ramen, drempelwaardes per tertsband waarboven het kan optreden, in de gegeven praktijksituatie klopt.

Relevante bevindingen

- Oorzaak betrof laag frequent geluid van een industriële bron met een grondtoon van 5 Hz.
- In de buurt van de machine lag het hoogste geluiddrukniveau bij de 1e boventoon, en bedroeg 110 dB.
- Bij het huis lag het hoogste niveau bij de 4e harmonische (20 Hz), en bedroeg daar 75 dB.
- In de presentatie noemt “NASA” criteria voor het opmerken van trillingen ten gevolge van geluid in constructieve elementen van huizen.
- Die criteria betreffen tertsbandwaardes voor achtereenvolgens ramen, wanden en vloeren. Ramen hebben de laagste drempelwaarden: 53 dB bij 4 tot 8 Hz, en vanaf daar met 3 dB per tertsband oplopend. Drempelwaarden voor wanden en vloeren zijn respectievelijk 12 en 24 dB hoger.
- Op twee avonden is gemeten en is de bewoners gevraagd of ze last hadden van “Rattle Noise”.
- De respons kwam overeen met het NASA criterium voor ramen: de eerste avond bleef het niveau onder het criterium voor ramen en waren er ook geen klachten over “Rattle Noise”. De tweede avond waren er substantiële overschrijdingen bij 10 en 20 Hz (tot 10 dB) en waren er wel “Rattle Noise” klachten.
- Conclusies die de presentatie trekt zijn:
  - Reeds matige niveaus van laag frequent geluid (5 tot 20 Hz) kunnen aanleiding geven voor merkbare trillingen in huizen.
  - De NASA criteria voor raamtrillingen correleren goed met de beleving van bewoners.

Kanttekeningen

Het geluidniveau dat nodig is om “Rattle Noise” in ramen te veroorzaken zal afhangen van de bouwstijl, en is vooral afhankelijk van het type raam (dikte, dubbelzijdig, etc.) en de wijze van bevestiging (inklemming, veroudering van stopverf, etc.). Amerikaanse bevindingen zijn daarom niet zomaar te vertalen naar de Nederlandse situatie.
Het wordt niet duidelijk of de “Rattle Noise” wordt veroorzaakt door het glas in de glassponning of wellicht door het raam (glas plus lijst) in de raamsponning.
Ook is niet duidelijk of de “Rattle Noise” wellicht niet (ook) wordt veroorzaakt door huisraad en/of (binnen-) deuren. Tevens ontbreekt het percentage van de huizen waarbij “Rattle Noise” wordt gerapporteerd.

4 Trillende bouwdelen en huisraad

4.1 Beschrijving effecten

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe geluid zich voortplant binnen een huis op basis van de beschikbare kennis en literatuur. In de volgende paragraaf wordt die literatuur behandeld, als onderbouwing van deze paragraaf.

4.1.1 Geluid

De door geluid van buiten aangestraalde trillende gevel straalt aan de binnenkant van het huis deze trillingen weer af als geluid. De mate van *gevelisolatie* beschrijft hoe effectief dat gebeurt. De isolatie door de gevel bedraagt meestal ten minste 20 dB, en voor nieuwe huizen geldt een wettelijke eis van 40 dB. Dit geldt, zoals aangegeven in het Bouwbesluit en in nationale en internationale normen, voor frequenties vanaf ongeveer 90 Hz. Onder de 90 Hz worden geen eisen gesteld aan de gevelisolatie, en is de gevelisolatie bovendien ook minder groot. Theoretisch neemt volgens de zogeheten “massa wet” de isolatie van geveldelen, zoals ramen en stenen- of betonnen muren af met 6 dB per octaaf. Bij 16 Hz komt dat neer op een gevel isolatie van hooguit 20 dB. In de praktijk is de afname nog sterker omdat de ramen de zwakste schakel vormen. Waar in oude huizen geldt dat, met enkel glas, de geluidisolatie bij 90 Hz al niet meer dan 20 dB zal bedragen en daardoor, vanwege de massa wet bij 16 Hz nog maar enkele dB’s, zo geldt dat in huizen, volgens het Bouwbesluit, het dubbelglas zijn extra isolerende werking onder de 90 Hz abrupt verliest door het optreden van spouwresonantie en er bij 16 Hz ook nog maar enkele dB’s isolatie over is.

De gevel is haast “doorzichtig” voor laagfrequent geluid. Mede vanwege de relatief geringe afmeting van de ramen ten opzichte van de golven is de oppervlakte van de ramen ook niet langer een parameter van betekenis. Wordt daarbij in rekening gebracht dat door grond/gevel-reflectie het geluiddrukniveau aan de gevel enkele dB’s hoger wordt, dan kan worden gesteld dat het laagfrequente geluidniveau binnen nagenoeg gelijk is aan het geluidniveau “in de straat”.

In bijzondere situaties, vooral bij geluid van bijvoorbeeld wegen en luchtvaart, wordt soms van overheidswege extra gevelisolatie geëist. Wederom geldt hier dat deze wordt toegespitst op “hogere” frequenties. Voor laagfrequent geluid heeft de extra isolatie over het algemeen weinig tot geen effect.

Samengevat kan worden gesteld dat hoogfrequent helikopter geluid door de gevel zal worden gedempt zoals verkeerslawaai, maar dat laagfrequente componenten ongehinderd het huis kunnen binnendringen.

De gevel geeft zijn trillingsenergie ook door aan andere bouwdelen, zoals plafonds, vloeren en binnenwanden. Deze stralen vervolgens ook geluid af in het huis. Dit heet “flankerend geluid”. Bij de beschouwing van de gevelisolatie worden deze paden ook in rekening gebracht. De bovengenoemde 20 dB reductie is dus inclusief de bijdrage van deze paden. Bij gangbare nieuwbouw spelen deze paden niet zo’n belangrijke rol (in tegenstelling tot bijvoorbeeld lichte bouwmethoden zoals houtskeletbouw). Voor de laagfrequente componenten van het geluid zijn deze paden echter wel van belang: de overdrachtsverliezen tussen bouwdelen is

geringer. Bovendien is de afstraalefficiëntie van bouwdelen in het huis bij (zeer) lage frequenties even groot als bij hoge frequenties. Maar omdat de isolatie hoog frequent vaak juist goed werkt neemt de bewoner vaak alleen het laag frequente geluid waar in het huis. Omdat bij lage frequenties de flankerende paden relatief belangrijk zijn, zal het geluid dieper/verder het huis binnendringen. Samen met de alzijdige inval van geluid op een huis, waarbij dus geen sprake meer is van een luwe zijde, is het laag frequent geluid in principe in elk vertrek hoorbaar.

Een bijkomend effect van het laagfrequente karakter van helikoptergeluid is dat er in het huis geen sprake is van een “egaal” c.q. diffuus geluidveld. In de ruimtes ontstaan staande golven waardoor er grote verschillen ontstaan in geluiddrukniveau binnen die ruimte. Die verschillen kunnen oplopen tot zo’n 18 dB tussen een hoek van een kamer en midden in de kamer.

Tot slot is van belang dat woonruimten relatief weinig laagfrequent geluid absorberen. Minder dan bij hogere frequenties. Woonruimten reageren dus als een soort klankkast.

Al deze effecten kunnen er toe bijdragen dat in het huis het laagfrequente geluid sterker wordt beleefd dan buiten het huis.

4.1.2 Trillingen

Het geluid van buiten leidt tot trillingen in de gevel en in de hoofddraagconstructie. Dit leidt weer tot trillingen in overige bouwdelen zoals plafonds, vloeren en wanden. Omdat laagfrequent geluid ramen redelijk ongehinderd kunnen passeren zullen deze bouwdelen in het huis ook via het geluid in het huis worden geactiveerd. Aangezien die overige bouwdelen vaak lichter zijn dan de gevel en/of hoofddraagconstructie, kan deze aanstraling van binnen uit de belangrijkste oorzaak zijn van de trillingen.

Uiteindelijk zal het van de situatie afhangen, en vooral ook van de frequentie, of trillende plafonds, vloeren en wanden leiden tot binnengeluid of vice versa.
Bij lage frequenties zal het pad van binnengeluid naar bouwdelen eerder domineren.

4.1.3 Voelbare trillingen

De in trilling gebrachte bouwdelen betreffen dus ook de vloeren. Naast het door deze vloeren afgestraalde (of ingestraalde) geluid kunnen bewoners deze trillingen ook direct voelen, als zij staan, zitten of liggen. De gevoeligheid voor horen neemt bij afnemende frequentie af maar voor voelen neemt deze juist toe. Dit betekent dat in een bepaalde situatie de trillingen van een vloer boven een zekere frequentie vooral als geluid worden waargenomen en daaronder vooral als trillingen.

Net als bij de staande geluidgolven in woonruimten is ook bij trillingen het modale gedrag[6] van de vloeren een dominante factor voor de voelbare trillingen. Bij de lage frequenties van helikoptergeluid (orde grootte 20 Hz) is er vaak sprake van maar een enkele buigmode van de bouwdelen die wordt aangeslagen van zeer lage orde (1ste of 2de) welke de grootste amplitudes kennen. Een opslingering van een factor 2

[6] Het resoneren in bepaalde akoestische modes.

of 3 is niet ongewoon. Bij oude houten vloeren met grote overspanningen kan dit oplopen tot een factor 5.
Voor het beoordelen van trillingen in verband met hinder wordt in Nederland de SBR Richtlijn B – trillingshinder in gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn gehanteerd. De beoordelingsgrootheid is de $V_{eff,max}$, een trillingsgrootheid die bij een geluidmeting neerkomt op een max-hold van een signaal dat met een fast-exponentieel filter wordt bemonsterd in een frequentiegebied tussen 1 en 80 Hz. De eenheid is dimensieloos (gemeten waardes worden gedeeld door 1 mm/s). Voor bestaande situaties, in huizen, stelt de richtlijn streefwaarden voor overdag en 's avonds van 0,8 en voor 's nachts 0,4. Voor nieuwe situaties (nieuwe huizen of nieuwe basis) zijn de streefwaarden resp. 0,4 en 0,2. De voelbaarheidsgrens ligt bij 0,1. Voelbare trillingen worden dus toelaatbaar geacht, zolang ze niet te sterk zijn.

4.1.4 Trillingsschade

Trillingen in de bouwdelen kunnen in sommige gevallen tot schade leiden.
Er zijn verschillende schademechanismen die hier een rol spelen.
Voor helikoptertrillingen zijn vooral de krachten van belang; die ontstaan op de aansluiting tussen relatief lichte bouwdelen welke door geluid in trilling worden gebracht en de zwaardere en/of stijvere delen die daar aan verbonden zijn maar die relatief stilstaan. Die krachten kunnen acuut een sterkte overwinnen en zo tot scheuren leiden, of door vermoeiing de sterkte van de aansluiting langzaam doen verminderen totdat scheuren ontstaan. Dergelijke (haar)scheuren, zijn te verwachten in bijvoorbeeld stucwerk bij de aansluiting van plafonds op muren.
Of de effecten optreden hangt mede af van de sterkte van de trilling: onder een drempelwaarde treedt geen acute schade op en onder een (lagere) drempelwaarde treedt geen vermoeiing op. Die drempelwaardes hangen af van materialen, ouderdom e.d. en liggen in de orde van 0,1 tot 10 mm/s.

Volgens het NLR-TNO onderzoek van 2011 [12] is dergelijke, cosmetische, schade niet uit te sluiten, hoewel schade nog moeten worden aangetoond in de Nederlandse situatie. Schade kan optreden als het geluiddrukniveau buiten op de gevel in en rond de 16 Hz octaafband de 100 dB overschrijdt. Volgens dit zelfde onderzoek is constructieve schade door helikoptergeluid, zijnde schade die de integriteit van de hoofddraagconstructie in gevaar brengen, onwaarschijnlijk.
Zie verder paragraaf 4.2.2.

Voor het beoordelen van trillingen in verband met schade wordt in Nederland de SBR Richtlijn A – schade aan gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn gehanteerd. De beoordelingsgrootheid is de V_{top}, een trillingsgrootheid die neerkomt op de maximale snelheidsamplitude van een signaal dat wordt bemonsterd in een frequentiegebied tussen 1 en 100 Hz. De eenheid is mm/s. V_{top} ligt in dezelfde orde van grootte als de $V_{eff,max}$ van de hinderrichtlijn maar is meestal wat groter (tot een factor 2).
Typische grenswaarden variëren van, omgerekend, 1 tot 40 mm/s, afhankelijk van bouwwijze en type trilling. Er kan dus worden gesteld dat de streefwaarden voor hinder strenger zijn dan de streefwaarden voor schade. Men kan ook stellen dat mensen gevoeliger zijn dan gebouwen. Trillingen zijn al zeer voelbaar voordat ze tot schade kunnen leiden. En waar bij de streefwaarden voor hinder sprake zal zijn van een substantieel deel van de bewoners dat zich gehinderd zal voelen, zijn de grenswaarden voor schade conservatief ingestoken. Pas bij een aantal malen hogere niveaus wordt kans op schade substantieel.

De schaderichtlijn is in feite niet zonder meer van toepassing voor trillingen die door geluid worden veroorzaakt. Verweven in de onderbouwing van de richtlijn is de aanname dat trillingen via de bodem in het gebouw terecht komen. Het NLR-TNO onderzoek van 2011 [12] gaat daar op in en komt tot de conclusie dat de richtlijn is te hanteren onder de volgende voorwaarden:

- indien een “uitgebreide” meting wordt gedaan conform de definitie daarvoor in de richtlijn,
- indien als grenswaarde 3 mm/s wordt gehanteerd.

4.1.5 Secundair geluid (“Rattle Noise”)

De trillende bouwdelen brengen de er aan verbonden huisraad in trilling: huisraad die aan het plafond is bevestigd, aan de wanden hangt of op de vloeren of op en in meubels staat. Deze huisraad kan ook direct in trilling worden gebracht door het binnengeluid. Dat zal alleen bij grote akoestisch doorzichtige bouwdelen spelen, aangezien de mate van instraling van zo’n bouwdeel afhangt van het oppervlak. Een andere reden waarom meestal sprake zal zijn van een “omweg” via een bouwdeel is dat deze door resonantie de trillingsamplitude verhogen.

Als huisraad in trilling wordt gebracht kan deze gaan roteren of zelfs transleren waardoor contactpunten met de ondersteuning (wand, vloer, kast, etc.) even loskomen. Door de zwaartekracht valt het betreffende object weer terug, wat een krachtpuls veroorzaakt dat leidt tot trillingen in dit object of in de ondersteuning, welke weer afstraalt als geluid. Dit “secundaire” geluid is relatief hoog frequent van karakter, hoewel dus oorspronkelijk veroorzaakt door laagfrequent geluid.

Het vrij komen van contactpunten leidt ertoe dat de beweging van het object mede wordt bepaald door zijn slingerfrequentie rond contactpunten die niet loskomen.
In extreme situaties waarin alle contactpunten loskomen, bepaalt de sterkte van de trilling de frequentie waarmee het object transleert. Met deze frequenties wordt het secundaire geluid gemoduleerd[7]: het fenomeen “Rattle Noise”. Figuur 4.1 toont, samenvattend, de dominante paden waarlangs geluid van de helikopter tot omzetting in “Rattle Noise” komt.
Kort samengevat komt het er op neer dat (laagfrequent) helikoptergeluid bij de gevel wordt omgezet in trillingen en “Rattle Noise” van ramen en buitendeuren, waarna de trillingen zich binnen het huis voortplanten om daar door binnendeuren en huisraad (ook) te worden omgezet in “Rattle Noise”.

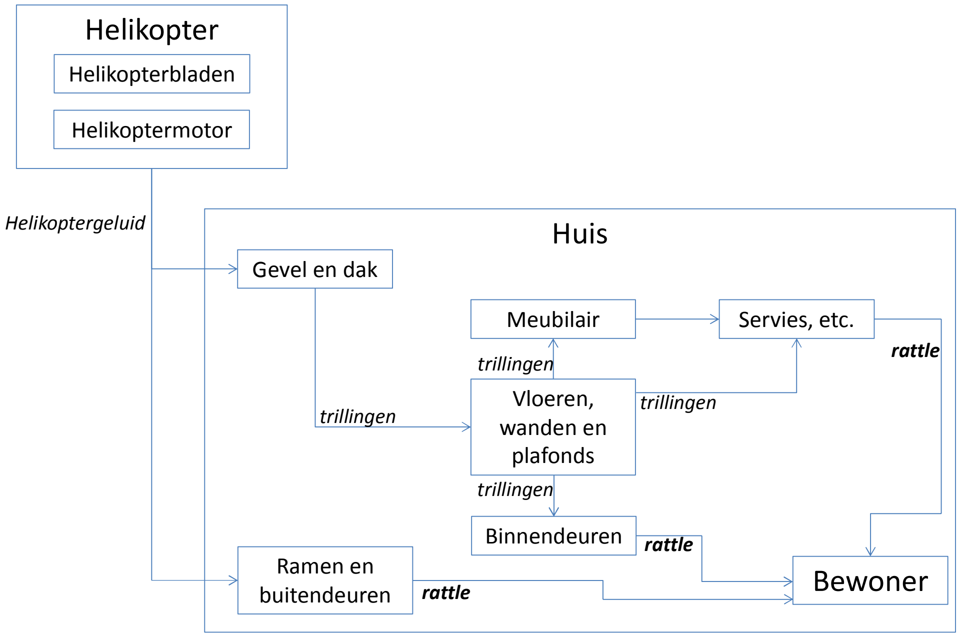
In Nederland is het fenomeen “Rattle Noise” niet eerder onderzocht maar volgens een onderzoek van Fidell [6] treedt hinder door “Rattle Noise” onder een laag frequent geluidniveau (25 – 80 Hz) op de gevel van 65 dB niet op. In de onderzochte (Amerikaanse) situatie is er wel al sprake van “Rattle Noise” in 25% van de huizen, bij 60 tot 65 dB. Er werd er vanaf 70 dB laag frequent geluid (buiten op de gevel) in 50%, en vanaf 85 dB in 70% van de huizen “Rattle Noise” gerapporteerd. Dit zijn gemiddelde waardes: er is het gemiddelde genomen van de vluchten tijdens de meetperiode. Het is goed mogelijk dat er een variatie was in geluidniveau tussen vluchten en dat, in het geval van 60 tot 65 dB gemiddeld niveau op de gevel, alleen de luidste vluchten aanleiding gaven tot “Rattle Noise”. Aannemende dat de bandbreedte van de variatie in de orde van 10 dB ligt is het

[7] Moduleren betekent hier: overgaan van de ene resonantie frequentie naar een andere, afhankelijk van de hoeveelheid energie.

waarschijnlijk dat alleen vluchten die tenminste 65 dB op de gevel veroorzaakten tot “Rattle Noise” leidden.

Dit onderzoek suggereert dat indien het laag frequent geluidniveau op de gevel onder de 65 dB ligt er geen risico is voor substantiële “Rattle Noise”, en dat boven de 70 dB laagfrequent geluid de kans substantieel is. Er zijn echter geen vergelijkbare onderzoeken bekend voor de Nederlandse bouwwijzen.

Vragen die naar aanleiding van het onderzoek van Fidell open blijven staan zijn:
– Hoe kunnen de resultaten van Fidell worden vertaald naar de Nederlandse bouwtypologieën?
– Hoe kunnen deze (breedbandige) resultaten van Fidell worden vertaald naar eisen aan tertsbanden, gezien het tonale karakter van helikopter geluid?
– Welke bronnen van “Rattle Noise” (ramen, deuren, schilderijen, kopjes, etc.) zijn dominant?



Figuur 4.1: Dominante paden voor de omzetting van helikoptergeluid naar “Rattle Noise”.

4.2 Behandeling belangrijkste literatuur

4.2.1 Fidell e.a., over de relatie tussen geluidniveau buiten en rattle binnen [6]

Fidell S, Silvati L, Pearsons K, Lind S, Howe R (1999). *Field study of the annoyance of low-frequency runway sideline noise*. J Acoust Soc Am 106, 1408-1415.

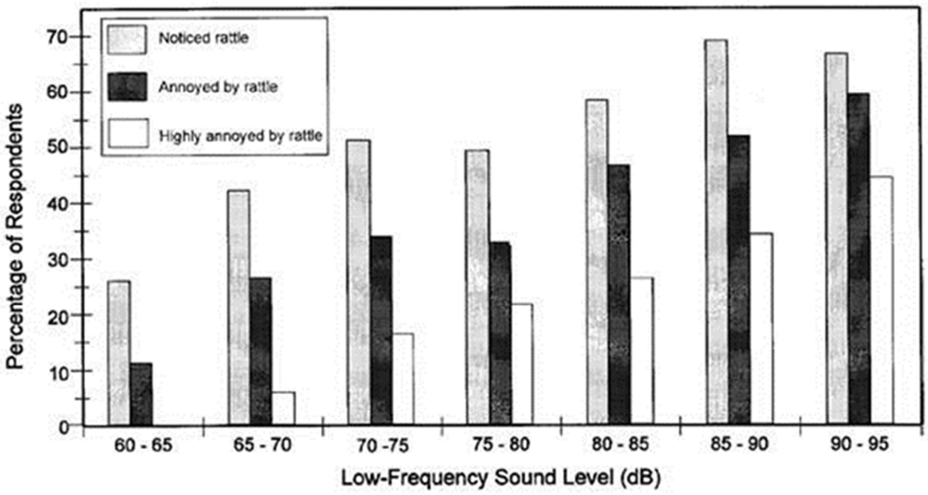
Samenvatting

In de buurt van twee startbanen is een belevingsonderzoek gehouden onder bewoners om te onderzoeken of zij last hebben van "Rattle Noise" en/of trillingen vanwege vliegtuigen. Daarbij zijn ook de geluidniveaus buiten de huizen in de buurt gemeten. Hieruit zijn dosis-effect relaties afgeleid, waarbij de dosis is gedefinieerd als laag frequent geluidniveau tijdens een passage. In dit onderzoek is het laag frequent geluidniveau gedefinieerd als, het niet A-gewogen gesommeerde maximum geluidniveau tijdens een passage van het vliegtuig van de 1/3-octaafbanden 25 – 80 Hz. Dit is vervolgens rekenkundig gemiddeld over alle passages per meetlocatie.

Relevante bevindingen

- Onder de 65 dB geluidniveau buiten op de gevel wordt door 25% van de respondenten "Rattle Noise" waargenomen, maar wordt geen ernstige hinder gerapporteerd.
- Bij 70-80 dB op de gevel wordt door 50% van de respondenten "Rattle Noise" gerapporteerd, en is 20% ernstig gehinderd.
- Bij 85-95 dB wordt door 70% van de respondenten "Rattle Noise" gerapporteerd, en is meer dan 30% ernstig gehinderd.

De grafiek in figuur 4.2 toont deze resultaten in meer detail.



Figuur 4.2: Overzicht Laag frequent geluidniveau en aantal gehinderde volgens onderzoek Fidell.

Kanttekeningen
In het onderzoek is het onduidelijk waar de “Rattle Noise” precies vandaan komt. Ook is de bouwwijze van het huis in de buurt waar het onderzoek is uitgevoerd niet bekend. Wel dat het gaat om eengezinswoningen en kleine appartementencomplexen.

4.2.2 *Heblij e.a., over schade van helikopterpassages [12]*
S.J. Heblij, A. Koopman, R.H. Hogenhuis, J. van 't Hof en A.R. Eisses (2011). *Mogelijke gebouwschade ten gevolge van helikoptervliegen - Toetsing trillingsmetingen aan SBR-richtlijn*. NLR-rapport NLR-CR-2011-457.

Samenvatting
In dit rapport, geschreven in opdracht van Defensie, worden de door het NLR gemeten trillingsniveaus in een huis bij Gilze, veroorzaakt door Chinook-passages, door TNO beoordeeld op mogelijke schadelijkheid voor het huis.

Relevante bevindingen
- Uit de resultaten blijkt dat de kans op constructieve schade aan gebouwen als gevolg van het helikopterverkeer zeer klein is.
- De meting is niet voldoende uitgebreid geweest om uit te kunnen sluiten dat cosmetische schade aan gebouwen kan ontstaan ten gevolge van helikopter vliegbewegingen van en naar de vliegbasis Gilze-Rijen.
- Er is een maximaal trillingsniveau aan de gevel gemeten van 0,5 mm/s (“V_{top}” conform SBR-richtlijn A), veroorzaakt door 100 dB voor de gevel.
- In een schaderapport dat ook behandeld wordt, welke was opgesteld door een derde partij, werd geconcludeerd dat er een causaal verband zou zijn tussen de aanwezige schade en de helikoptervluchten. Volgens NLR/TNO ontbreekt echter een deugdelijke bewijsvoering en wordt correlatie met causaliteit verward.
- SBR-richtlijn A (schade aan gebouwen door trillingen) kan worden aangepast voor de beoordeling van gebouwtrillingen vanwege vliegtuigen en helikopters indien een uitgebreide meting als meetmethode wordt gehanteerd en als de grenswaarde (voor panden met een vergelijkbare bouwkundige staat als de onderzochte huis) 3 mm/s wordt.

4.2.3 *Hubbard, over het opwekken van gebouwtrillingen door geluid [14]*
Hubbard, H.H. *Noise induced house vibrations and human perception;* Noise Control Engineering Journal. Vol.19, 1982, pp.49-55

Samenvatting
In dit artikel wordt uiteengezet hoe geluid van vliegtuigen en helikopers leidt tot trillingen in een huis en vervolgens tot “Rattle Noise” van huisraad. Het wordt samengevat tot criteria voor geluid op de gevel, in de vorm van drempelwaarden per tertsband, waarboven binnenshuis voelbare trillingen gaan optreden. Voor “Rattle Noise” wordt geen geluidcriterium afgeleid.

Relevante bevindingen
De grafiek in Figuur 4.3 toont trillingscriteria voor “Rattle Noise”. Voor horizontaal geplaatste huisraad is het criterium eenvoudig de zwaartekrachtsversnelling, waarboven de huisraad loskomt en dus met een tik weer terugvalt.
Voor opgehangen huisraad, hangende langs wanden, is het criterium een fractie

daarvan, gelijk aan de zwaartekrachtsversnelling maal de sinus van de hoek waaronder de huisraad tegen de wand aanhangt. Hubbard hanteert daarvoor de (arbitraire) waarde van 3 graden.

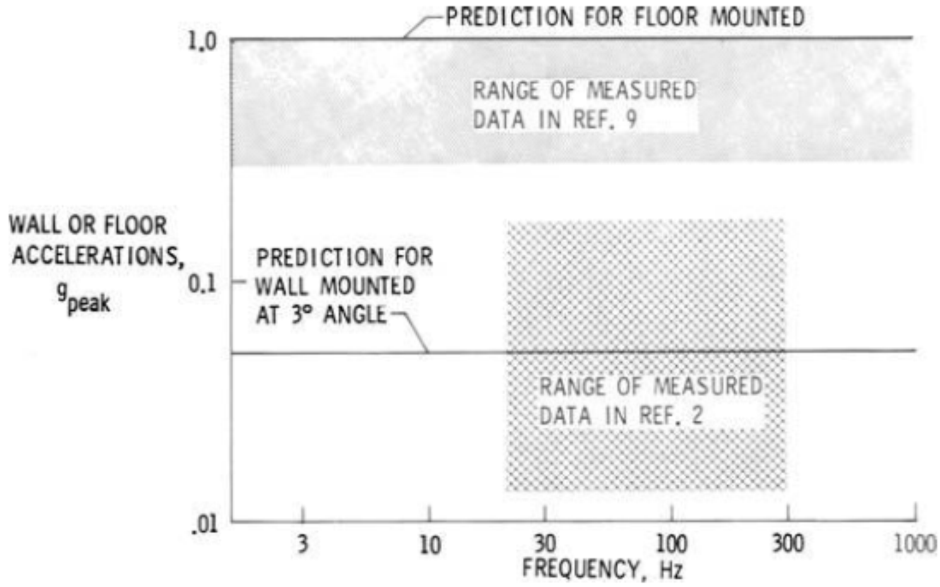


Figure 7—Criteria for the rattling of wall and floor mounted objects due to vibratory excitation

Figuur 4.3: Criteria voor “Rattle Noise” van huisraad, in g ([10 m/s2]), voor horizontaal geplaatste en verticaal langs wanden hangende objecten.

Figuur 4.4 toont de voorgestelde drempelwaarden voor het geluid aan de gevel waarboven merkbare gebouwtrillingen kunnen optreden.
De grafiek is afgeleid uit twee ingrediënten: enerzijds de ISO-curven (ISO 2631) voor whole-body vibration, en anderzijds de theoretische, en door de auteur met metingen bevestigde, overdracht van trillingen naar geluid. Dit is onderzocht voor de Amerikaanse bouwstijl. De auteur merkt op dat niet geheel duidelijk is wat de betekenis is van de voelbaarheid van trillingen in ramen en wanden, zeker gezien de gehanteerde norm voor “gehele lichaamstrillingen”. Het gaat in ieder geval niet over “Rattle Noise” als wijze van opmerken.

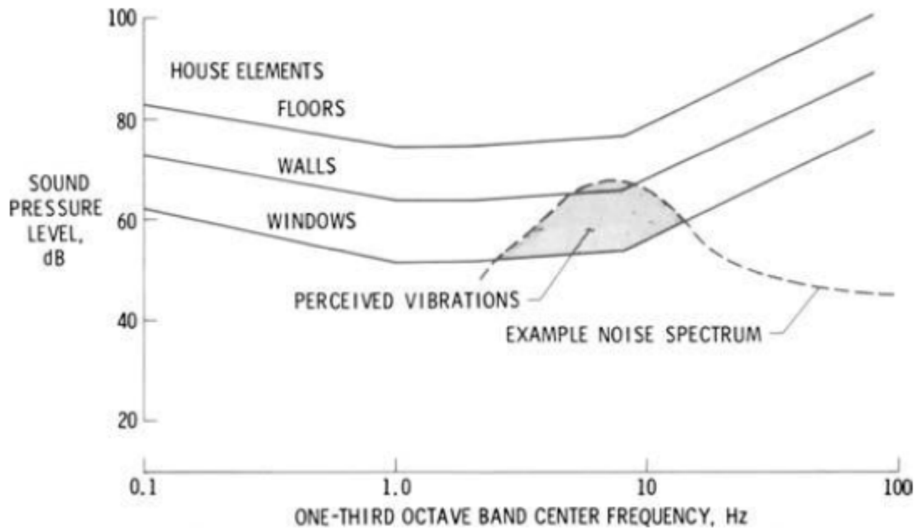


Figure 9—Sound pressure levels sufficient to cause perceptible vibrations of house structure elements over a range of frequencies

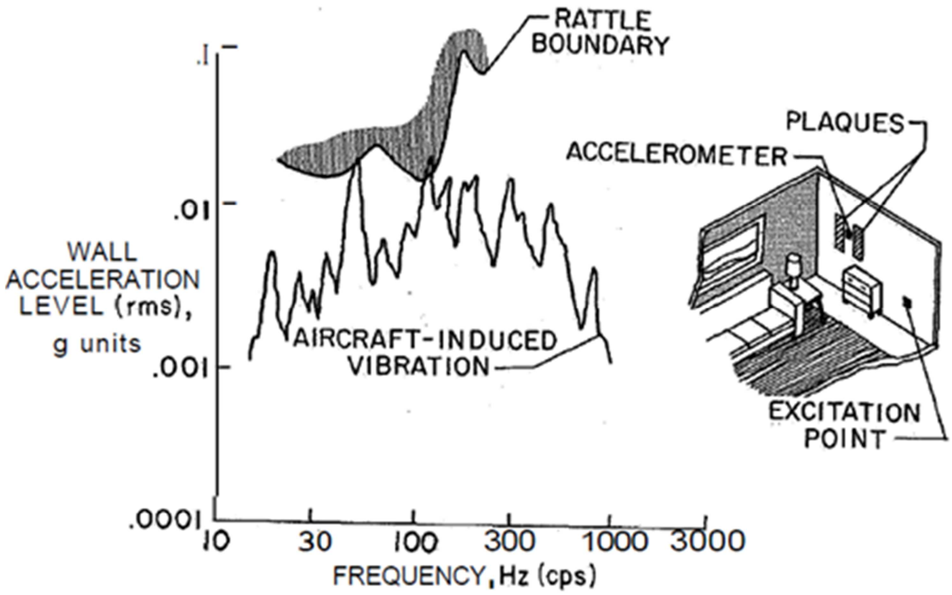
Figuur 4.4 : Geluiddrukniveau (SPL) voldoende om "merkbare" trillingen van elementen in een huis te veroorzaken. Dit betreft niet "Rattle Noise".

Kanttekeningen
Dit onderzoek lijkt de bron te zijn van de NASA-criteria, zoals genoemd door o.a. Brooks [3]. Brooks toont aan dat het raamcriterium mooi samenvalt met al dan niet optreden van "Rattle Noise" van ramen, hetgeen dus op toeval moet berusten gezien de afleiding van Hubbard.

4.2.4 Mayes e.a., over benodigd trillingsniveau voor rattle van schilderijen [20]
W. H. Mayes, D.S. Findley, and H. D. Carden; *House vibrations significant for indoor subjective response*; NASA Langley Research Center.

Samenvatting
Met behulp van een shaker zijn trillingen opgewekt in de wand van een huis en is vastgesteld bij welke niveaus "Rattle Noise" van schilderijen optreedt. Hieruit is een spectraal versnellingscriterium afgeleid.

Relevante bevindingen
De gevonden grens is weergegeven in figuur 4.5. In dezelfde figuur is ook het acceleratie spectrum (van dezelfde wand) als gevolg van een vliegtuig fly-over weergegeven.



Figuur 4.5: Versnellingsniveau waarboven “Rattle Noise” van langs de wand hangende objecten optreedt (de grijze arcering, bepaald met behulp van een shaker, gepresenteerd samen met een grafiek van gemeten trillingen van vliegtuigen).

Kanttekeningen

Dit is een case-study, dus niet zomaar te generaliseren. Anderzijds zijn de resultaten minder bouwwijze afhankelijk dan andere Amerikaanse studies aangezien de versnelling direct aan de wand wordt gemeten. Het is niet van belang wat er is gedaan om de versnelling op te wekken, noch welke rol de wandconstructie daarbij speelde, het is hier uiteindelijk gegaan om de versnelling die de schilderijlijst ervaart.

4.2.5 *Schomer e.a., met adviezen voor het rattle-proof maken van huizen [33]*

Schomer PD, Hottman SD, Kessler FM, Kessler RK (1987). *Expedient methods for rattle-proofing certain housing components.* USA-CERL technical report N-87/24.

Samenvatting

Het rapport beoogt advies te geven over het voorkomen van “Rattle Noise” vanwege vliegbewegingen e.d. Rattle wordt behandeld in de breedste zin: “Rattle Noise” van bouwelementen zoals ramen en deuren evenals van huisraad zoals schilderijen, apparaten en kopjes.

Er wordt kort ingegaan op de theorie achter “Rattle Noise” en er worden twee praktijkmetingen geciteerd. Voor de rest is het vooral een opsomming en kwalitatieve behandeling van alle mogelijke soorten bouwelementen en objecten.

In een bijlage staan detailtekeningen van de behandelde soorten ramen en deuren e.d.

Relevante bevindingen

Alles wat los is moet vast worden gezet, en anders moet er op z’n minst een viltje tussen gezet worden. Deur- en raamsystemen die toleranties kennen, en niet op stuit dicht of open staan, kunnen “Rattle Noise” vertonen.

Figuur 4.6 geeft Japanse meetresultaten voor de relatie tussen geluidniveau en "Rattle Noise" van een aantal soorten bouwelementen, ramen en deuren.
Figuur 4.7 geeft dit voor schilderijlijsten.
.

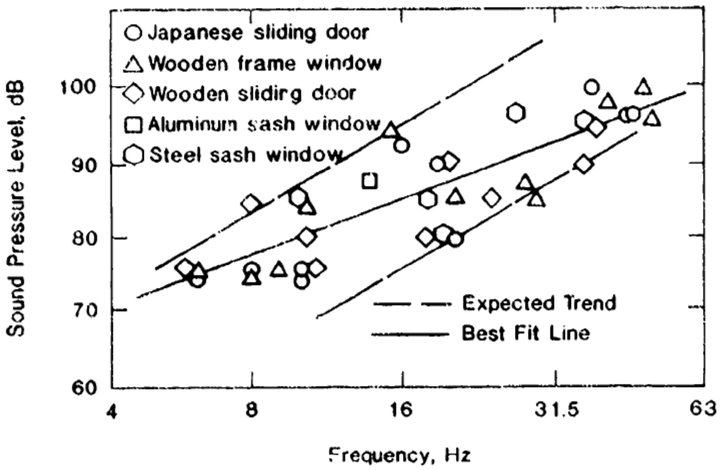
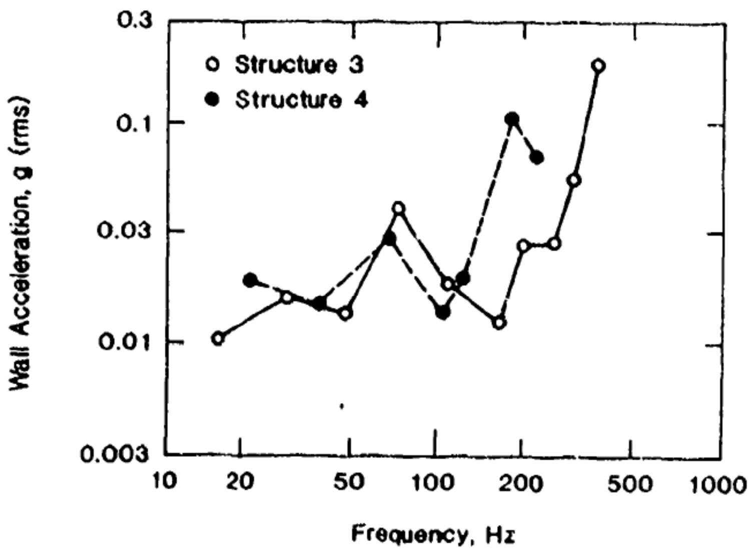


Figure 2. Experimental data on rattle threshold for windows and doors. (Source: Y. Tokita and S. Nakamura, "Frequency Weighting Characteristics for Evaluation of Low Frequency Sound," *Proceedings, 1981 International Conference on Noise Control Engineering* [Netherlands Acoustical Society, 1981]. Used with permission.)

Figuur 4.6: Japanse meetresultaten van de relatie tussen geluidniveau en "Rattle Noise" van een deur en raam, met verschillende bevestigingsconstructies, zoals gebruikt door Schomer.



Wall accelerations at the rattle threshold for wall-hung plaques. (Source: H. D. Carden and W. H. Mayes, *Measured Vibration Response Characteristics of Four Residential Structures Excited by Mechanical and Acoustical Loadings*, NASA TN D-5778 [National Aeronautics and Space Administration, April 1970].)

Figuur: 4.7: Japanse meetresultaten van de relatie tussen versnellingsniveaus en "Rattle Noise" van schilderijlijsten, zoals gebruikt door Schomer.

Kanttekeningen
De behandeling van verschillende soorten ramen en deuren is illustratief en ook bruikbaar voor de Nederlandse situatie. De geciteerde Japanse meetresultaten over de relatie tussen geluid en "Rattle Noise" zijn te veel gericht op Japanse omstandigheden en kunnen niet in Nederland worden gehanteerd.

4.2.6 ANSI S12.9-2005/Part 4 (revision of ANSI S12.9-1996/Part 4) [40]

Samenvatting
Deze Amerikaanse norm geeft een handreiking om geluidniveaus te bepalen in de omgeving van geluidbronnen en de hinder beleving in de omgeving door langdurige blootstelling aan dat geluid te beoordelen.

Relevante bevindingen
Annex D gaat met name in op geluid met een sterk laagfrequente component. Laagfrequent geluid is de sommatie van de niveaus in de octaafbanden 16, 31.5 en 63 Hz (< 100 Hz). Als het "Rattle Noise" optreedt dan wordt het gekenmerkt als zeer hinderlijk. Om "Rattle Noise" te voorkomen wordt een geluidniveau lager dan 70 dB geadviseerd.

Kanttekeningen
Of het geadviseerde geluidniveau voor de gevel of binnen in het huis geldt is niet duidelijk. Ook deze norm beschrijft dat bij deze lage frequenties de isolatie van het huis minimaal is zodat 70 dB voor de gevel gehanteerd zou kunnen worden.
Ook hier geldt weer dat het vooral gaat over Amerikaanse huizen die vaak bestaan uit lichte bouwconstructies en niet met Nederlandse woningbouw zijn te vergelijken.

4.2.7 ANSI/ASA S12.2-2008 (Revision of ANSI S12.2-1995) [41]

Samenvatting
Deze Amerikaanse norm gaat in op een aantal methoden om geluid en door geluid geïntroduceerde trillingen in huizen te meten en te evalueren.

Relevante bevindingen
Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van laagfrequente geluidniveaus, in 1/3-octaafbanden, waarbij de kans bestaat dat door geluid geïntroduceerde trillingen en "Rattle Noise" waargenomen kan worden door bewoners.
Laagfrequent geluid is de sommatie van de niveaus in de octaafbanden 16, 31.5 en 63 Hz (< 100 Hz).

Table 6 — Measured sound pressure levels for perceptible vibration and rattles in lightweight wall and ceiling structures

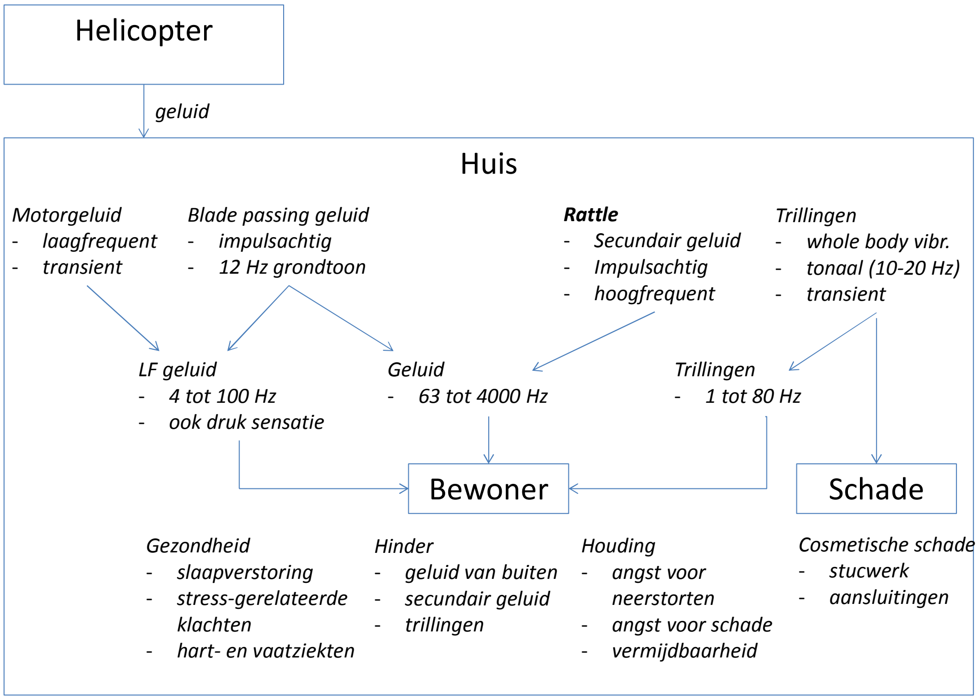
Octave-band center frequency (Hz) (band number)	16 (12)	31.5 (15)	63 (18)
Clearly perceptible vibration and rattles likely	75	75	80
Moderately perceptible vibration and rattle likely	65	65	70
NOTE Values are sound pressure levels in decibels 20 μPa.			

Kanttekeningen
De onderzochte huizen bestaan uit lichte Amerikaanse constructies.

5 Reactie bewoner

5.1 Beschrijving effecten

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de kennis over effecten van geluid en trillingen veroorzaakt door helikopters op bewoners. Deze beschrijving is gebaseerd op een literatuurstudie, waarvan de belangrijkste uitkomsten per literatuurbron worden behandeld in de volgende paragraaf. De effecten worden beschreven aan de hand van de volgende paragrafen: Hinder (door geluid van buiten, secundair geluid in het huis, trillingen), Houding (angst voor neerstorten, angst voor schade aan het huis, vermeende vermijdbaarheid door verantwoordelijken), Gezondheid (slaapverstoring, stress-gerelateerde klachten, hart- en vaatziekten).



5.1.1 Hinder

Er zijn geen aanwijzingen dat helikoptergeluid door het impulsachtige karakter als hinderlijker wordt ervaren dan ander vliegtuiggeluid. De consensus is dat een correctiefactor op het A-gewogen geluidniveau voor de impulsiviteit van helikoptergeluid niet gerechtvaardigd is. Echter, zodra er ook secundair geluid ("Rattle Noise") wordt opgewekt door het in trilling brengen van onderdelen of voorwerpen in huis, kan dit wel aanleiding zijn tot extra hinder, en lijkt een correctiefactor op het A-gewogen geluidniveau vereist. Daarnaast speelt de houding van bewoners een rol bij hinder (5.1.2).

5.1.2 Houding

De houding van bewoners ten opzichte van helikopters lijkt in belangrijke mate de dikwijls verhoogde hinder door helikoptergeluid te verklaren. Meer hinder wordt gerapporteerd wanneer men bang is dat helikopters neerstorten, of wanneer men denkt dat helikoptergeluid voorkomen kan worden door de piloot of

verantwoordelijke instanties. Ook blijkt de hinder hoger in gebieden waar helikopters worden beschouwd als 'rich man's toy'. Verder, hoewel er geen aanwijzingen zijn dat helikoptertrillingen schade veroorzaken aan het huis, kan angst hiervoor mogelijk bijdragen aan hinder van trillingen of "Rattle Noise".

5.1.3 *Gezondheid*

Er is nauwelijks onderzoek gedaan naar gezondheidseffecten zoals slaapverstoring, stress-gerelateerde klachten of hart- en vaatziekten als gevolg van geluid van helikopters. Eén studie biedt aanwijzingen dat chronische blootstelling aan militair vliegtuiggeluid vanwege de nabijheid van een helikopterbasis samenhangt met een verhoogde kans op hoge bloeddruk. Echter, om conclusies te trekken over causaliteit of risicovolle niveaus is meer onderzoek nodig met grotere aantallen proefpersonen.

5.2 Behandeling belangrijkste literatuur

Hieronder worden de bevindingen uiteengezet van een literatuurstudie naar geluidhinder door helikopters. De resultaten worden per studie besproken, waarbij de studies gegroepeerd zijn naar onderwerp. Studies besproken in een eerder TNO-rapport (Passchier-Vermeer [22]) zijn aangevuld met een aantal recentere studies, en ook is het overzichtsrapport van de Federal Aviation Administration (USA) geraadpleegd over niet-militair helikoptergeluid in een stedelijke omgeving (FAA, 2004 [5]).

5.2.1 *De rol van impulsgeluid bij hinder door helikoptergeluid*

Een groot deel van de literatuur over hinder door helikoptergeluid richt zich op de mogelijke bijdrage van het impulsachtige karakter ervan aan de hinder.
Naar aanleiding van de uitkomsten van de veelal experimentele studies is de consensus onder de deskundigen dat een correctiefactor voor de impulsiviteit van helikoptergeluid niet gerechtvaardigd is (FAA, 2004 [5]).

- In het kader van ISO 3891 (1978) is onderzocht of er vanwege het impulsachtige karakter van helikoptergeluid een correctiefactor ('penalty') zou moeten worden toegepast op geluidmaten voor vliegverkeer, hiervoor is echter onvoldoende bewijs gevonden (Powell, [23]; Berry, [2]).
- Ollerhead [25], in een laboratoriumonderzoek waarin 40 proefpersonen werden blootgesteld aan de geluiden van 89 helikopter- en 30 vliegtuig overvluchten, vond dat het geluid van helikopters gemiddeld als iets hinderlijker werd ervaren dan het vliegtuiggeluid, waarbij een vliegtuigpassage resulteert in dezelfde geluidhinder als een helikopter overvlucht met een 2 dB lagere SEL-waarde. Daarbij bleek echter de mate waarin het helikoptergeluid een impulsachtig karakter had niet van invloed te zijn op de geluidhinder.
- Gjestland [11] vond, in een laboratoriumonderzoek waarin 20 proefpersonen de hinderlijkheid beoordeelden van het geluid van overvluchten van vier typen helikopters en van vliegtuigen, dat het geluid van grote helikopters (Super Puma AS322 en Sea King S61) bij gelijke SEL-waarden als iets minder hinderlijk beoordeeld werd dan vliegtuiggeluid, hoewel dat van kleinere helikopters (Bell 205 en Westland Lynx) juist als hinderlijker werd ervaren.
- Schomer & Wagner [35] vonden, in een experimenteel onderzoek met 350 proefpersonen in speciaal geconstrueerde testhuizen, dat geluid van de relatief kleine UH-1H Huey helikopter buitenshuis of binnenshuis met geopende ramen

als ongeveer even hinderlijk werd ervaren als het geluid van diverse soorten wegverkeer. En dat het binnenshuis bij gesloten ramen zelfs minder hinderlijk was dan bij wegverkeer, terwijl andere impulsachtige geluidbronnen (explosies, wapens) tot een gelijke geluidhinder leidde als wegverkeersgeluid dat 10 tot 15 dB hoger was.

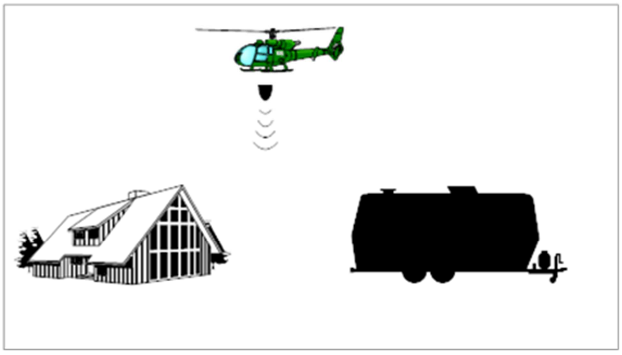
- Fields & Powell [9] ondervraagden in een experimenteel veldonderzoek 330 deelnemers die gewend waren aan helikoptergeluid in hun woonomgeving, waarbij deze gedurende 22 dagen werden blootgesteld aan het geluid van 2 typen speciaal ingezette overvliegende helikopters. Bij gelijke SEL-waarden vonden de deelnemers het impulsachtige geluid van de relatief kleine UH-1H Huey helikopter iets hinderlijker dan het minder impulsachtige geluid van de grotere UH 60-A Black Hawk. Het (statistisch niet-significante) verschil in hinderlijkheid komt overeen met een verschil in SEL-waarde van minder dan 2 dB, en de conclusie was dat er geen belangrijk verschil is tussen geluidhinder door types met impulsief en geen impulsief geluid.

5.2.2 *De rol van “Rattle Noise” en trillingen bij hinder door helikoptergeluid*

Slechts twee (gerelateerde) experimentele veldonderzoeken hebben zich gericht op de bijdrage van “Rattle Noise” en trillingen aan de hinder door helikoptergeluid. Hierbij bleek dat, zodra er secundair geluid (“Rattle Noise”) wordt opgewekt door het in trilling brengen van onderdelen of voorwerpen in huis, er aanleiding kan zijn tot extra hinder en een correctiefactor van minimaal 10 dB op het A-gewogen geluidniveau. Verder is de rol van “Rattle Noise” en trillingen onderzocht bij hinder door vliegtuiggeluid, waarbij verhoogde hinder lijkt te worden veroorzaakt door optreden van “Rattle Noise” en/of trillingen.

- Schomer & Neathammer [32] toonden in een experimenteel veldonderzoek met echte helikopters (UH-1H Huey) aan dat 201 proefpersonen, gezeten in een houten buitenhuis, in een caravan of in een tent, zie Figuur 5.1, het geratel en de trillingen veroorzaakt door helikopters als zeer hinderlijk ervoeren.
  De hinderlijkheid van het helikoptergeluid werd vergeleken met de hinder door een controlestimulus bestaande uit witte ruis (500 Hz octaafband). De mate van trillingen of “Rattle Noise” in het huis en in de caravan werd door beoordelaars geschat op een schaal van ‘geen’, ‘matig’, tot ‘veel’. De hinder door geluid van overvliegende helikopters die geen trillingen of geratel opwekten bleek ongeveer vergelijkbaar met de hinder door de controlestimulus van gelijke SEL-waarde. Echter, de hinder van overvliegende helikopters waarbij tevens trillingen en geratel werden waargenomen bleek gelijk te zijn aan de hinder van helikopter overvluchten met een 10 dB hogere SEL-waarde zonder trillingen en geratel, tot zelfs 20 dB bij sterke trillingen of geratel. Dit suggereert dat een correctiefactor van minimaal 10 dB moet worden gebruikt bovenop het A-gewogen geluidniveau wanneer er sprake is van trillingen of “Rattle Noise”.
  De onderzoekers concluderen verder dat het gebruik van C-gewogen SEL-waarden, die de perceptie van laagfrequent geluid beter verdisconteren, weinig of geen verbetering in de voorspelling van hinder oplevert ten opzichte van de A-gewogen SEL-waarden. Daarnaast bleek de mate waarin de helikopters rechtstreeks overvliegen (en mogelijk angst opwekken) in deze experimentele situatie niet van invloed op de resultaten, dus dit kan niet als alternatieve verklaring dienen voor de effecten van trillingen en “Rattle Noise” in deze studie. Waarschijnlijk werd de extra hinder inderdaad veroorzaakt door het waarnemen van secundair geluid, aangezien de enige objectieve maat (naast

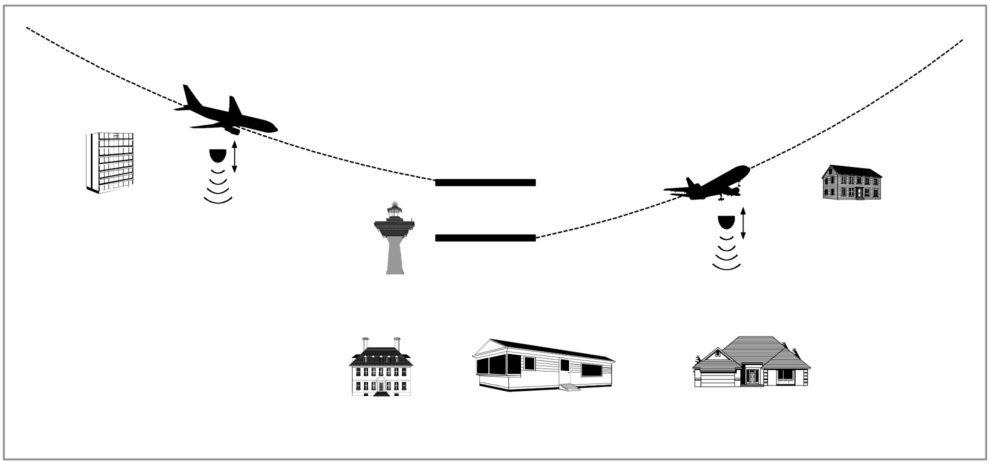
SEL) die enige relatie met de hinder vertoonde de mate van acceleratie van het raam was, de belangrijkste bron van “Rattle Noise”.



Figuur 5.1 : Schomer & Neathammer (1987) experiment.

Uit deze studie werd verder geconcludeerd dat er geen of weinig “Rattle Noise” wordt veroorzaakt door helikopters met een ‘slant’ afstand van 1000 voet (330 m) of meer (de afstand tussen de bron en de waarnemer, deze werd systematisch afgewisseld in het experiment). Bij een ‘slant’ afstand van minder dan 500 voet werden bijna altijd sterke niveaus van “Rattle Noise” waargenomen, en dit gebied wordt door de onderzoekers dan ook afgeraden als woongebied te gebruiken. De zonegrens voor bewoning ligt volgens hen ergens tussen een ‘slant’ afstand van 500 en 1000 voet, en ook boven deze grens geldt een correctiefactor op het A-gewogen geluidniveau bij lichte “Rattle Noise”. Het is echter niet duidelijk in hoeverre deze bevindingen te generaliseren zijn naar andere situaties, aangezien ze zeer specifiek kunnen gelden voor de constructie van een houten buitenhuis of de caravan.

- Schomer, Hoover & Wagner [34] in een uitbreiding en gedeeltelijke replicatie van bovenstaande experimentele veldstudie, vonden een klein verschil in hinderlijkheid tussen helikoptertypen met tweebladige rotoren en typen met meerbladige rotoren, waarbij, op basis van de extra hinder die ze veroorzaken door het teweegbrengen van trillingen en “Rattle Noise”, correcties van respectievelijk 10 dB en 8 dB bovenop het A-gewogen geluidniveau aangeraden werden.
- Cawthorn, Dempsey & DeLoach [4] hadden eerder een enigszins vergelijkbare veldstudie uitgevoerd naar hinder door geluid en trillingen van conventionele vliegtuigen zoals die gewoonlijk overvliegen in de omgeving van J.F.K International Airport (JFK). Ze maten geluid en trillingen in 8 huizen onder de vluchtroute, waar 16 proefpersonen (zowel bewoners als leden van het meet-team) werden bevraagd over totaal 109 overvluchten (zie figuur 5.2). Slechts bij 3 overvluchten werd “Rattle Noise” door minimaal de helft van de personen waargenomen, terwijl dit voor trillingen bij 21 overvluchten het geval was. Dit suggereert dat de invloed van “Rattle Noise” in situaties met overvliegende vliegtuigen te verwaarlozen is. Wanneer echter de waarnemingsdrempel voor trillingen bereikt werd, bleek de hinder hoger dan wanneer dit niet het geval was (de range van verticale trillingen waarbij dit gebeurd correspondeert ongeveer met een A-gewogen SPL buitenshuis van 100-105 dB(A), in overeenstemming met uitkomsten van een NLR studie uitgevoerd in 2011 (S.J. Heblij, p. 2011)). Het waarnemen van trillingen lijkt dus een belangrijke invloed te hebben op de hinder door vliegtuiggeluid.



Figuur 5.2 : Cawthorn, Dempsey & DeLoach (1978) experiment.

- Cawthorn, Dempsey & DeLoach [4] deden ook een labstudie met speciale focus op de rol van "Rattle Noise". In een ruimte (4 x 6 x 2,5 m) die zoveel mogelijk op een huiskamer leek kregen 24 proefpersonen 71 dB(A) vliegtuiggeluid aangeboden in combinatie met verschillende niveaus van "Rattle Noise" van glazen in een kast (45-61 dB(A), gemeten op de plek van de proefpersoon). The 50% waarnemingsdrempel voor "Rattle Noise" werd gevonden bij 47 dB(A), de hinderdrempel bij 56 dB(A). Verder werd een experiment gedaan waarbij vliegtuiggeluid van verschillende niveaus (71-81 dB(A)) werd aangeboden met of zonder '"Rattle Noise" van 62 dB(A). Hierbij bleek de hinder op te lopen met niveau van vliegtuiggeluid, maar werd geen invloed van "Rattle Noise" gevonden (mogelijk ten gevolge van de kunstmatige situatie).
- Fidell en anderen [6] onderzochten de hinder door grondgeluid van vliegtuigbewegingen onder 644 bewoners in de buurt van de zuidelijke start- en landingsbanen van Los Angeles International Airport (LAX). Zij vonden dat respondenten die aangaven ernstig gehinderd te zijn door vliegtuiggeluid geconcentreerd waren in gebieden waar de blootstelling aan laagfrequente geluidniveaus door vliegtuigbewegingen uitkwam boven 75-80 dB (ongewogen gesommeerd niveau in 1/3-octaafbanden 25-80 Hz). Tevens vonden zij dat het laagfrequente geluidniveau nauw samenhing met het percentage respondenten dat aangaf ernstige hinder te hebben van "Rattle Noise" of trillingen in hun huis. Zij concludeerden dat A-gewogen geluidniveaus wellicht geen goede reflectie geven van het laagfrequente deel van het geluid, terwijl laagfrequent geluid juist potentieel hinderlijke secundaire geluiden kan opwekken binnen huizen.
- Fidell en anderen [7], in een gedeeltelijke replicatie van deze studie, toetsten de invloed van verschillen in akoestische isolatie van de huizen op de hinder door grondgeluid van vliegtuigen. Zij bevroegen 495 bewoners rondom Minnesota-St. Paul International Airport (MSP), waarvan bij 177 akoestische maatregelen waren getroffen aan hun huis voor een 5 dB reductie in het A-gewogen geluidniveau. Ze vonden min of meer dezelfde relatie als in de eerdere studie tussen laagfrequente geluidniveaus en ernstige hinder van geratel of trillingen in hun huis, waarbij een prevalentie van ongeveer 20% ernstige hinder verwacht wordt onder mensen die blootgesteld worden aan een laagfrequent geluidniveau van 75-80 dB (10% bij 70 dB, tot wel 30% bij 85-90 dB, zie ook figuur 4.2). Bovendien vonden zij dat respondenten bij wie akoestische maatregelen waren getroffen significant minder hinder rapporteerden dan

respondenten bij wie dit niet was gebeurd. Dit verschil kon niet verklaard worden door een substantiële reductie in laagfrequente geluidniveaus, maar kan te maken hebben met de installatie van niet-trillende ramen, de meest voorkomende bron van “Rattle Noise”.

5.2.3 *De rol van houding en emotie bij hinder van helikopters onder omwonenden*

Veel van de hierboven beschreven studies naar hinder door helikoptergeluid zijn gedaan in een experimentele situatie met proefpersonen. Echter, in de werkelijkheid lijkt de houding van bewoners ten opzichte van helikopters (zoals angst voor neerstorten, angst voor schade, vermijdbaarheid) in belangrijke mate de dikwijls verhoogde hinder door helikoptergeluid te verklaren.

- Schomer [31] vond onder 2348 omwonenden van een militaire basis dat helikoptergeluid en vliegtuiggeluid even vaak ernstige hinder oproepen wanneer ze als even luid worden ervaren (hoewel dat uiteraard nog niet betekent dat dit ook geldt voor gelijke geluidbelasting).
- Schomer [36] heeft 231 omwonenden van de kleine luchthaven Decatur (USA) bevraagd naar geluidhinder door verschillende bronnen. Hoewel hier slechts een keer per week een helikopter landde en vertrok, zei 6,5% hierdoor ernstig gehinderd te zijn, tegenover de 8,7% die ernstige hinder aangaf door de gewone vliegtuigen die de geluidbelasting domineerden.
- Atkins, Brooker & Critchley [1], in de ‘UK 1982 Helicopter Disturbance Study’, vonden een verhoogde reactie op helikoptergeluid ten opzichte van ander vliegtuiggeluid bij helikopters die gebruikt werden voor vervoer tussen de vliegvelden Gatwick en Heathrow. In Lower Feltham, waar de bijdrage aan de geluidbelasting van helikopters en gewone vliegtuigen ongeveer gelijk was, was het aantal mensen dat helikopters verstorender vond meer dan 2 keer zo hoog als het aantal mensen dat de vliegtuigen verstorender vond. In Esher en Epsom, waar de aantallen helikopters en vliegtuigen ongeveer gelijk aan elkaar waren (en de geluidbelasting van gewone vliegtuigen ongeveer 5 dB hoger dan die van helikopters), bleek de hinder door helikopters ongeveer 2 keer zo hoog. Echter, in Balmedie, een gebied met alleen helikopters ingezet ten behoeve van olieplatforms, was de hinder juist relatief laag, mogelijk doordat helikopters hier gezien werden als noodzakelijk transportmiddel. Over alle gebieden heen bleek de angst voor neerstorten een belangrijke voorspeller van de hinder.
- Fields & Powell [9] vonden in de hierboven beschreven experimentele veldonderzoek dat meer hinder werd gerapporteerd wanneer men bang is dat helikopters neerstorten, of wanneer men denkt dat helikoptergeluid voorkomen kan worden door de piloot of verantwoordelijke instanties.
- Ollerhead and Jones [26] onderzochten reacties op helikoptergeluid in drie gebieden in de buurt van Battersea Heliport (UK), een helikopterhaven die vooral gebruikt wordt voor vervoer tussen de vliegvelden Gatwick en Heathrow en waar ook vliegtuigen te horen zijn. In totaal werden 700 bewoners bevraagd, waaronder bewoners in twee gebieden met alleen vliegtuiggeluid. Ondanks lagere geluidniveaus veroorzaakten de helikopters meer hinder dan de vliegtuigen. Uit de interviews bleek dat een aantal houdingen of constateringen ten opzichte van helikopters samenhingen met een verhoogde reactie: angst voor neerstorten, gebrek aan informatie, te laag vliegen, resulterende trillingen, en het idee dat de piloot of de ‘operator’ de overlast meer kan beperken.
  De auteurs suggereerden ook dat bewoners helikopters vaak beschouwden als ‘rich man’s toy’.

- Ook een studie van Wyle Research [39]vond aanwijzingen voor een verhoogde negatieve reactie op helikoptergeluid. Op het Marine Corps Air Station te Miramar (USA), waar bewoners al sinds lange tijd te maken hadden met F-14 straaljagers, werden F-18 straaljagers en helikopters ingevoerd. Dit leidde vrijwel onmiddellijk tot klachten van bewoners over het geluid en bezorgdheid over het mogelijk neerstorten van helikopters, hoewel de geluidcontouren nauwelijks verschilden van de eerdere situatie en de helikopters maar een kleine bijdrage leverden aan het totale geluid.

5.2.4 Studies naar mogelijke gezondheidseffecten van helikoptergeluid

Hoewel er nauwelijks onderzoek is gedaan naar mogelijke gezondheidseffecten van geluid van helikopters, biedt de hieronder beschreven studie aanwijzingen dat chronische blootstelling aan militair vliegtuiggeluid vanwege de nabijheid van een helikopterbasis samenhangt met een verhoogde kans op hoge bloeddruk.
Dit is in lijn met eerdere bevindingen uit onderzoek naar gezondheidseffecten van vliegtuiggeluid. Echter, om conclusies te trekken over causaliteit of risicovolle niveaus is meer onderzoek nodig met grotere aantallen proefpersonen.

- In een epidemiologische studie in Zuid-Korea (Rhee e.a., [27]) werd de invloed van chronische blootstelling aan militair vliegtuiggeluid op de prevalentie van hypertensie (hoge bloeddruk) onderzocht. De studiepopulatie bestond uit 137 omwonenden (leeftijd 60±14 jaar) binnen een straal van 5 km rondom een helikopterbasis, 486 omwonenden (58±16 jaar) binnen een straal van 5 km van een basis voor straalvliegtuigen, en een controlegroep van 252 bewoners die in hun woonomgeving niet aan vliegtuiggeluid werden blootgesteld. Hierbij bleek de prevalentie van hypertensie hoger te zijn in de groep die blootgesteld werd aan militair vliegtuiggeluid dan in de controlegroep. Dit verschil was het grootst voor de omwonenden van de helikopterbasis, suggererend dat de effecten op bloeddruk afhankelijk zijn van het type geluid en vooral voor helikoptergeluid optreden. De aantallen proefpersonen zijn echter nogal laag om epidemiologische verbanden te bestuderen, en er is geen informatie beschikbaar over geluidniveaus. De resultaten moeten daarom vooral als aanwijzing worden gezien voor nader onderzoek.
- Hoewel er verder geen onderzoek naar specifieke gezondheidseffecten van helikoptergeluid is verricht, blijkt uit verschillende onderzoeken naar effecten van vliegtuiggeluid dat er verbanden zijn tussen de chronische blootstelling van bewoners aan vliegtuiggeluid (mogelijk vooral nachtelijke blootstelling) en indicatoren voor gezondheidseffecten, zoals hypertensie, (slechte) zelf-gerapporteerde gezondheid en gebruik van medicatie voor slapeloosheid en hart- en vaatziekten (Franssen e.a., 2004; Jarup e.a., 2008). Het is niet duidelijk of deze effecten ook optreden bij de vaak relatief geringe jaargemiddelde blootstelling aan helikoptergeluid.

6 Hoofdlijn bevindingen

6.1 Wat is “Rattle Noise”?

“Rattle Noise” is het geluid veroorzaakt door het snelle verlies en herstel van het contact tussen los verbonden objecten, zoals bijvoorbeeld kopjes op tafels of in kasten of ramen los in de sponningen.

6.2 Onder welke omstandigheden treedt “Rattle Noise” op?

Geluidbronnen kunnen laagfrequent geluid genereren waardoor bouwdelen in trilling gebracht kunnen worden. Tevens komt het laagfrequente geluid het huis binnen door de geveldelen, die over het algemeen dit geluid slecht tegenhouden. Laagfrequent geluid en/of trillingen kunnen de huisraad die aan de wanden hangt of op de vloeren staat laten trillen waardoor het “Rattle Noise” geluid kan ontstaan. Voor zowel het in trilling brengen van bouwdelen als de geluidisolatie geldt uiteraard dat dit sterk afhankelijk is van de constructie van een huis.

Als huisraad in trilling wordt gebracht kan deze gaan roteren of zelfs transleren waardoor contactpunten met de ondersteuning (wand, vloer, kast, etc.) even loskomen. Door de zwaartekracht valt het betreffende object weer terug. Dit kan geluid afstralen en wordt “Rattle Noise” genoemd. Het “Rattle Noise” geluid is relatief hoog frequent van karakter. Een dergelijke situatie van “Rattle Noise” is een klassiek voorbeeld van een niet-lineair verschijnsel waarbij de excitatie van een bouwdeel met een lage frequentie resulteert in een respons van huisraad op een andere, hogere frequentie. Huisraad die aan een wand of plafond is opgehangen zal veel eerder gaan trillen dan huisraad die op een tafel, in een kast of op de grond, horizontaal is opgesteld.

De huisraad kan ook direct in trilling worden gebracht door binnengeluid. Dat zal alleen bij grotere onderdelen kunnen spelen, aangezien de mate van instraling afhangt van het oppervlak. Een andere reden waarom meestal sprake zal zijn van een “omweg” via een bouwdeel is dat deze door resonantie de amplitude van de trilling verhogen.

Uit de literatuur blijkt dat “Rattle Noise” in een huis kan ontstaan als gevolg van laagfrequent geluid, frequenties lager dan 100 Hz. Een aantal referenties geven een laagfrequent geluidniveau aan, niet A-gewogen gesommeerd over de 1/3-octaafbanden tot 100 Hz, waarbij “Rattle Noise” niet wordt waargenomen. Fidell [6] noemt een niveau van 65 dB terwijl de ANSI S12.9-2005 [40] een niveau van 70 dB adviseert. Bij hogere niveaus (> 70 dB) is er een mogelijkheid dat “Rattle Noise” optreedt.

Dit literatuuronderzoek en de analyse van het gemeten geluid van helikopters laat zien dat helikopters vooral tijdens het naar de waarnemer toe vliegen, verhoogde laagfrequente geluidniveaus kunnen genereren. Het fenomeen “Rattle Noise” kan daarbij ontstaan. “Rattle Noise” is niet specifiek een fenomeen dat alleen ontstaat bij helikopters maar kan net zo goed ontstaan als gevolg van laagfrequent geluid

van een tunnelboormachine of als gevolg van het geluid van een vrachtwagen of bus met stationair draaiende motor.

Uit het door TNO en NLR in 2011 uitgevoerd onderzoek [12] naar mogelijke gebouwschade ten gevolge van over huizen vliegende helikopters blijkt dat er een kans op schade aan een huis kan voorkomen als het geluidniveau, voor de gevel, ten gevolge van de laagfrequent frequentie componenten (< 100 Hz) groter is dan 100 dB en het huis specifieke gevoelige delen heeft. Volgens de literatuur kan "Rattle Noise" optreden bij niveaus > 65 dB. "Rattle Noise" kan dus bij lagere geluidniveaus op de gevel optreden dan het geluidniveau waar mogelijk schade aan het huis kan ontstaan. In het geval van de geanalyseerde geluidmeting van een over een huis vliegende helikopter, met dubbele rotorbladen en met een load op een hoogte van ca. 500 voet, bedraagt het gemeten laagfrequente geluidniveau tot 100 Hz ca. 98 dB. Volgens het onderzoek van Fidell [6] wordt bij een dergelijke geluidniveau door 70% van de respondenten "Rattle Noise" gerapporteerd en is meer dan 30% ernstig gehinderd. Hierbij moet in ogenschouw genomen worden dat het type huis niet duidelijk gespecificeerd is bij dit in Amerika uitgevoerde onderzoek.

6.3 Wat zijn de effecten van "Rattle Noise"?

Er is consensus in de literatuur dat het impulsachtige karakter van helikoptergeluid zelf niet tot gevolg heeft dat het als hinderlijker wordt ervaren dan ander vliegtuiggeluid. Echter, zodra er secundair geluid ("Rattle Noise") wordt opgewekt door het in trilling brengen van onderdelen of voorwerpen in huis, kan dit aanleiding zijn tot extra hinder door helikoptergeluid (of vliegtuiggeluid). Uit onderzoek bij helikoptergeluid blijkt dat in dat geval een correctiefactor van minimaal 10 dB op het A-gewogen geluidniveau vereist is om te compenseren voor deze extra hinder. Daarnaast lijkt de houding van bewoners ten opzichte van helikopters in belangrijke mate de dikwijls verhoogde hinder door helikoptergeluid te verklaren. Meer hinder wordt gerapporteerd wanneer men bang is dat helikopters neerstorten, of wanneer men denkt dat helikoptergeluid voorkomen kan worden door de piloot of verantwoordelijke instanties. Hoewel er weinig aanwijzingen zijn dat helikoptertrillingen schade veroorzaken aan het huis, kan angst hiervoor mogelijk ook bijdragen aan hinder van trillingen of "Rattle Noise". Verder, in lijn met bevindingen uit onderzoek naar gezondheidseffecten van vliegtuiggeluid, biedt één studie voorzichtige aanwijzingen voor een verhoogde kans op hoge bloeddruk onder bewoners in de nabijheid van een helikopterbasis.

7 Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

1. Definiëren van een meet- en beoordelingsmethode voor het verrichten en beoordelen van geluid- en trillingsniveaus voor het optreden van “Rattle Noise” in een Nederlands huis. Waarbij de meetmethode zoals opgenomen in de richtlijn van de Stichting Bouwresearch, voor het meten en beoordelen van schade aan bouwwerken door trillingen, als uitgangspunt kan dienen.

2. Onderzoek doen naar verschillende objectieve maten van het geluidniveau buitenshuis en de mate waarin dit met “Rattle Noise” binnenhuis correleert. Dit onderzoek moet duidelijk maken welke maat het best trillingen en “Rattle Noise” en daardoor veroorzaakte hinder voorspeld.

3. Na het vastleggen van een meetmethode en correlatie van het geluid en het optreden van “Rattle Noise” zouden rekenmodellen ontwikkeld kunnen worden om te voorspellen wanneer “Rattle Noise” kan optreden:
   a. Bij welke trillingsniveaus verliezen losjes verbonden objecten contact met de muren, vloer, etc. (Mayes et al. [20]) met criteria aangepast aan de Nederlandse situatie.)
   b. Bij welke frequentie(s) van de vloer, muur, trillingen constateert men “Rattle Noise”.
   c. Is er iets te doen aan geluid en trillingen met deze frequenties om “Rattle Noise” te mitigeren.

4. Meer onderzoek naar effecten:
   Er is slechts zeer beperkte informatie uit onderzoek over welke ‘slant’ afstand (de afstand tussen de bron en de waarnemer) leidt tot welke mate van (waargenomen) “Rattle Noise”. Ook is niet duidelijk of deze informatie te generaliseren is naar andere omstandigheden en bouwstijlen dan die in het beschreven USA onderzoek (UH-1H Huey, houten constructie en caravan).

   Er is behoefte aan dosis-effect relaties voor de verwachte hinder door “Rattle Noise” bij een bepaalde geluidbelasting of bij specifieke karakteristieken van het geluid. Hiertoe is een aanzet gedaan in onderzoek naar hinder door grondgeluid van vliegtuigen in de USA, maar onduidelijk is of deze relaties te generaliseren zijn naar situaties met helikoptergeluid in Nederland.

   Hoewel de resultaten van een Zuid-Koreaanse studie suggereren dat bewoners in de nabijheid van een helikopterbasis een verhoogde kans hebben op hoge bloeddruk, zijn de aantallen proefpersonen nogal laag om epidemiologische verbanden te bestuderen, en is er geen informatie beschikbaar over geluidniveaus. Om conclusies te trekken over causaliteit of risicovolle niveaus is meer onderzoek nodig met grotere aantallen proefpersonen. Naast hoge bloeddruk zijn ook andere gezondheidsmaten relevant, in het bijzonder slaapverstoring.

8 Literatuurlijst

[1]. Atkins CLR, Brooker P, Critchley JB (1983). *Helicopter disturbance study: main report*. Civil Aviation Authority, DR Report 8304, London, UK

[2]. Berry BF, Fuller HC, John AJ, Robinson DW (1979). *The rating of helicopter noise: development of a proposed impulse correction*. NPL Report Ac 93, Teddington, UK

[3]. Brooks BM (1993). *Low Frequency Noise Induced Vibration of Housing Structure*. Proc. Ac.Soc.Am. 126th meeting, Colorado

[4]. Cawthorn JM, Dempsey TK, and DeLoach R (1978). *Human response to aircraft noise-induced building vibration*. Proceedings of the AHS/NASA/Army Specialists Meeting on Helicopter Acoustics, Hampton, VA (NASA CP-2052)

[5]. FAA (2004). Report to Congress: *Nonmilitary Helicopter Urban Noise Study*. Report of the Federal Aviation Administration to the United States Congress, Washington DC, USA

[6]. Fidell S, Silvati L, Pearsons K, Lind S, Howe R (1999). *Field study of the annoyance of low-frequency runway sideline noise*. J Acoust Soc Am 106, 1408-1415.

[7]. Fidell S, Pearsons K, Silvati L, Sneddon M (2002). *Relationship between low-frequency aircraft noise and annoyance due to rattle and vibration*. J Acoust Soc Am 111, 1743-1750.

[8]. Fidell S, Horonjeff RD, Smithz FH (2010). *Research plans for improving understanding of effects of low frequency noise of heavy lift rotorcraft.* NASA rapport NASA/CR-2010-216203

[9]. Fields JM, Powell CA (1987). *Community reactions to helicopter noise: results from an experimental study*. J Acoust Soc Am 82, 479-492.

[10]. Franssen E, Van Wiechen CMAG, Nagelkerke N, Lebret E (2004*). Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use*. Occup Environ Med 61, 405–413

[11]. Gjestland T (1994). *Assessment of helicopter noise annoyance : a comparison between noise from helicopters and from jet aircraft*. J Sound Vib 171, 453-458.

[12]. Heblij SH, Koopman A, Hogenhuis RH, Van 't Hof J en Eisses AR (2011). *Mogelijke gebouwschade ten gevolge van helikoptervliegen - Toetsing trillingsmetingen aan SBR-richtlijn*. NLR-rapport NLR-CR-2011-457.

[13]. K. Hodgdon, A. Atchley, R. Bernhard. *Low frequency noise study*; The Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction; PARTNER-COE-2007-001

[14]. Hubbard, H.H. *Noise induced house vibrations and human perception;* Noise Control Engineering Journal. Vol.19, 2982, pp.49-55

[15]. International Organization for Standardization (1978). ISO 3891-1978*. Acoustics – Procedure for describing aircraft noise heard on the ground*. ISO, Geneva, Switzerland.

[16]. Jarup L*, et al*. on behalf of the HYENA study team (2008). *Hypertension and exposure to noise near airports*: the HYENA Study. Environ Health Perspect 116, 329–333.

[17]. JanakiRam, R. D.: *Aeroacoustics of Rotorcraft.* AGARD FDP Special Course, 1990

[18]. Johnson, W. *Helicopter Theory*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1980.

[19]. Kendrick, P., Waddington, D., Kerry, G., Adams, M., Rahulan, T., Wai Lam, Y. (2008). *Research into the improvement of the management of helicopter noise*. University of Salford, Manchester.

[20]. W. H. Mayes, D.S. Findley, and H. D. Carden; *House vibrations significant for indoor subjective response*; NASA Langley Research Center.

[21]. McCluer, M. S. (1996). *Helicopter blade-vortex interaction noise with comparisons to CFD calculations.* Technical Report NASA TM-110423, NASA Ames Research Center.

[22]. Passchier-Vermeer W (1994). *Rating of helicopter noise with respect to annoyance*. TNO report PG 94.061, Leiden, The Netherlands.

[23]. Powell CA (1978). *A subjective field study of helicopter blade slap noise*. NASA Report TM 78756, Washington DC, USA.

[24]. Ohshima, T., & Yamada, I. (2009). *Study on the effect of sound duration on the annoyance of helicopter noise by applying a technique of time compression and expansion of sound signals*. Applied Acoustics, 70 (9), 1200-1211. doi:10.1016/j.apacoust.2009.03.006

[25]. Ollerhead JB (1982*). Laboratory studies of scales for measuring helicopter noise*. NASA Contractor Report 3610, Washington DC, USA.

[26]. Ollerhead JB, Jones CJ (1994). *Social survey of reactions to helicopter noise*. Civil Aviation Authority, London, UK.

[27]. Rhee M-Y, Kim H-Y, Roh S-C, Kim H-J, Kwon H-J (2008). *The effects of chronic exposure to aircraft noise on the prevalence of hypertension*. Hypertension Research 31, 641-647.

[28]. Rice C.G. (1996). *Human response effects of impulse noise.* Journal of Sound and Vibration, 190(3), 525-525. doi:10.1006/jsvi.1996.0077.

[29]. Santa Maria, O. L.; Farassat, F.; Morris, P. J. *Two-dimensional Fourirt Transform Analysis of Helicopter Flyover Noise*. American Helicopter Society 55th, annual Forum, Montreal, Quebec, May 25–27, 1999.

[30]. Schomer P. D., Neathammer R. D. *The role of vibration and rattle in human response to helicopter noise;* J. Acoust. Soc. Am. Volume 81, Issue 4, pp. 966-976(1987); (11 pages)

[31]. Schomer PD (1981). *Community response to impulse noise: Initial Army survey*. Construction Engineering Research Library, Report TR N-100, Champaign, USA.

[32]. Schomer PD, Neathammer RD (1987). *The role of helicopter noise-induced vibration and rattle in human response*. J Acoust Soc Am 81, 966-975.

[33]. Schomer PD, Hottman SD, Kessler FM, Kessler RK (1987). *Expedient methods for rattle-proofing certain housing components.* USA-CERL technical report N-87/24.

[34]. Schomer PD, Hoover BD, Wagner LR (1991*). Human response to helicopter noise: a test of A-weighting.* Construction Engineering Research Library, Report TR N91-13, Champaign, USA.

[35]. Schomer PD, Wagner LR (1995). *Human and community response to military sounds: results from field-laboratory tests of small arms, 25 mm cannon, helicopters and blast sound*. Noise Control Eng J 43, 1-13

[36]. Schomer PD (1983). *A survey of community attitudes towards noise near a general aviation airport.* J Acoust Soc Am 74, 1773-1781

[37]. Schmitz, F. H.: Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. Vol. I. NASA R_P-1258,Aug. 1991, pp. 65-149.

[38]. Wie, S. Y., Im, D. K., Kwon, J. H., Lee, D. J., Chung, K. H., & Kim, S. B. (2011). *Helicopter rotor noise in the merged tip* Aeroacoustics, 10(4), 427-442. doi:10.1260/1475-472X.10.4.427

[39]. Wyle Research (1995). *Aircraft noise study for Marine Corps Air Station Miramar (CA).* Wyle Laboratories Report WR 94-25, 1995, Arlington (VA) USA.

[40]. ANSI/ASA S12.9-2005/Part 4 (Revision of ANSI S12.9-1996/Part 4), *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Environmental*

Sound – Part 4: Noise Assessment and Prediction of Long-term Community Response.

[41]. ANSI/ASA S12.2-2008 (Revision of ANSI S12.2-1995), *Criteria for Evaluating Room Noise*.

9 Ondertekening

Den Haag, februari 2013

Namens de Auteurs

Ing. P. Hendriksen
Afdelingshoofd
Akoestiek en Sonar

T. van Veen (NLR)

J. van 't Hof (TNO)

Distributielijst

1/5	Ir. V.M.J. Gales Ministerie van Defensie BS/AL/DRMV inclusief digitale versie bijgeleverd op cd-rom
6/7	NLR t.a.v. de heer T.A. van Veen inclusief digitale versie bijgeleverd op cd-rom
8/9	TNO, vestiging Den Haag, Archief
10/12	TNO, Dr. S.A. Jansen Drs. A. Koopman J. van ‘t Hof